

Universität Kaiserslautern

Methoden und Werkzeuge zur recyclinggerechten Automobilentwicklung

Beim Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Klaus Ruhland

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Januar 2006

Promotionskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Renz
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Zusammenfassung

Das Recycling von Automobilen leistet einen wesentlichen Beitrag zur Schonung der natürlichen Ressourcen und Reduzierung der entstehenden Abfallmengen. Dabei kommt dem Automobilhersteller eine zentrale Rolle zu, da nur durch die frühzeitige Berücksichtigung der Recyclinganforderungen bei der Entwicklung der Produkte sichergestellt werden kann, dass diese zukünftig auch in umweltgerechter und wirtschaftlicher Weise einer erneuten Nutzung zugeführt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, welches die Recyclinganforderungen systematisch in die Ablauf- und Aufbauorganisation von Fahrzeugentwicklungsprojekten integriert. Die Grundlage bildet ein Prozessmodell, welches in den frühen Phasen der Entwicklung die Ableitung von Recyclingzielen mit Hilfe der Szenario-Technik ermöglicht und in den nachfolgenden Phasen der Entwicklung die Zielerreichung durch einen formalisierten Recycling-Problemlösezyklus sicherstellt. Das zentrale Element stellt ein Planungsinstrument dar, welches mögliche Demontage- und Recyclingprozesse bereits innerhalb der Produktentwicklung simuliert und dadurch eine ganzheitliche Optimierung des Fahrzeuges unterstützt.

Die Auswertung verschiedener Recyclingszenarien am Beispiel eines Mittelklasse-PKW hat gezeigt, dass mit der heutigen Prozesskette der Altfahrzeugverwertung eine Reduzierung der Abfallmengen nicht kostendeckend erreichbar ist. Erst unter Berücksichtigung neuer Verwertungstechnologien für die heute zu entsorgenden Restmengen kann die wirtschaftliche Situation verbessert werden. Gleichzeitig konnte durch die Bewertung unterschiedlicher Rohbaukonzepte nachgewiesen werden, dass der Ersatz konventioneller Materialsysteme durch innovative Leichtbauwerkstoffe das Recycling am Lebensende des Fahrzeuges zunehmend erschwert.

Um bereits innerhalb der Produktentwicklung die Voraussetzung für ein hochwertiges Fahrzeugrecycling zu schaffen ist somit das Zusammenführen und Ausbalancieren von produkt- und prozessbezogenen Maßnahmen unabdingbar. Die organisatorische Umsetzung erfolgt dabei durch ein Recyclingteam, welches es ermöglicht das Recyclingwissen in die komplexen Entwicklungsabläufe zu integrieren und mit allen Prozessbeteiligten zeitlich und inhaltlich abzustimmen.

Abstract

The recycling of automobiles has a major contribution to the protection of the natural resources and the reduction of the waste streams. Therefore, the car manufacturer plays a key role, because only the implementation of recycling aspects in the early stages of the development process ensures, that the end of life treatment of the automobiles can be handled in an economically and environmentally sound manner.

This thesis develops the concept and the implementation of Design for Recycling in the automobile development process and organisation. The basis is a process model, which determines recycling targets in the early phases of the development process by scenario analysis and which controls the fulfilment of the targets in the following process steps by a formalised recycling PDCA cycle (Plan, Do, Check, Act). To assist the Design for Recycling procedure a software tool and database were established. The functionality includes the simulation and assessment of the dismantling and recycling performance aiming at the overall optimisation of the vehicle.

The analysis of different recycling scenarios is demonstrated by an exemplary case study of a middle-class automobile. It is shown that the reduction of the waste streams can not be achieved in an economical way by the current process of automobile recycling. For further optimization of the economical situation new recycling technologies have to be developed. The assessment of different body in white concepts shows that on the other hand the replacement of conventional material systems by innovative lightweight design complicates the recycling of future vehicles.

In order to achieve a high quality recycling concept of future vehicles as part of the development process, an optimal combination and balance of product and process specific aspects have to be ensured. The organisational implementation into the development process is formalised by a recyclingteam, which guarantees that each function of the complete vehicle is covered by the recycling aspects.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand auf der Grundlage einer Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Ressourcengerechte Produktentwicklung der Universität Kaiserslautern und der Mercedes-Benz PKW-Entwicklung der DaimlerChrysler AG.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Renz, gilt mein besonderer Dank für die fachliche und persönliche Unterstützung meiner Arbeit. Das entgegengebrachte Interesse sowie die wertvollen Denkanstöße waren wesentliche Faktoren für die erfolgreiche Bearbeitung dieser Thematik.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper, Leiter des Instituts für Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth, bin ich zu besonderem Dank für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen fachlichen Hinweise verpflichtet. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner für die Leitung der Prüfungskommission.

Mein herzlicher Dank gebührt insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Bruno Stark, Leiter der Abteilung „Umweltgerechte Produktentwicklung“ der DaimlerChrysler AG, für die stetige fachliche und menschliche Förderung. Das in mich gesetzte Vertrauen und die gewährten Freiräume für die wissenschaftliche Arbeit waren für mich eine große Unterstützung. Weiterhin möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung bedanken, die mir durch ihre Diskussionsbeiträge wertvolle Anregungen gaben.

Vor allem aber bedanke ich mich bei meiner Frau und meiner Tochter für deren langjähriges Verständnis.

Inhaltsverzeichnis

I Abbildungsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Grundlagen des Recyclings	5
2.1 Begriffe und Definitionen zum Recycling	5
2.1.1 Recycling-Kreislaufarten	5
2.1.2 Recycling-Formen	6
2.1.3 Recycling-Behandlungsprozesse	7
2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen des Recyclings	13
2.2.1 Abfallpolitik der Europäischen Union	15
2.2.2 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	17
3 Altfahrzeugrecycling	20
3.1 Aktueller Stand des Altfahrzeugrecyclings	20
3.1.1 Ablauf des Altfahrzeugrecyclings	20
3.1.2 Problembereiche des Altfahrzeugrecyclings	22
3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen des Altfahrzeugrecyclings	23
3.2.1 Altfahrzeug Richtlinie der Europäischen Union	24
3.2.2 Altfahrzeug Gesetz Deutschland	24
3.2.3 Typgenehmigung Recyclingfähigkeit	26
3.2.4 Altfahrzeug Gesetz Japan	27
3.3 Zusammenfassung	28
4 Produktentwicklung und Recycling	30
4.1 Fahrzeug-Entwicklungsprojekte	30
4.1.1 Prozess der Fahrzeugentwicklung	32
4.1.2 Organisation der Fahrzeugentwicklung	37
4.1.3 Informationstechnische Hilfsmittel	39

4.2	Recyclinggerechte Produktentwicklung -Stand der Technik	41
4.2.1	Recyclingaspekte im Entwicklungsprozess	41
4.2.2	Organisation der recyclinggerechten Produktentwicklung	44
4.2.3	Hilfsmittel zur recyclinggerechten Produktentwicklung	45
4.3	Zusammenfassung	49
5	Konzept zur recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung	51
5.1	Gesamtkonzept	51
5.2	Prozess der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung	53
5.2.1	Planungsphase	56
5.2.2	Technologiephase	63
5.2.3	Fahrzeugphase	68
5.3	Rechnergestützter Recycling Problemlösezyklus	71
5.3.1	Zieldefinition und Präzisierung der Aufgabenstellung	73
5.3.2	Systemanalyse	75
5.3.3	Systemsynthese	77
5.3.4	Systembewertung	80
5.3.5	Systemauswertung	82
5.4	Aufbau des Planungsinstrumentes SIDORA	84
5.4.1	Aufbau des Produktmodelles	85
5.4.2	Aufbau des Demontagemodelles	88
5.4.3	Aufbau des Recyclingmodelles	90
5.4.4	Simulation und Bewertung von Recyclingmöglichkeiten	98
5.4.5	Verfahrensablauf zur Datenermittlung in SIDORA	101
5.5	Organisation der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung	105
6	Anwendungsbeispiel Mittelklasse PKW	110
6.1	Planungsphase	110
6.2	Technologiephase	115
6.3	Fahrzeugphase	120
7	Fazit und Ausblick	127
	Literaturverzeichnis	129

I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2.1: Recyclingmöglichkeiten im Produktlebenszyklus	6
Abbildung 2.2: Teilschritte des Demontageprozesses	9
Abbildung 2.3: Teilschritte der Aufarbeitung	10
Abbildung 2.4: Teilschritte der Aufbereitung	11
Abbildung 2.5: Struktur und Kernbereiche des Umweltrechts	14
Abbildung 2.6: Begriffsbestimmungen zum Recycling	18
Abbildung 3.1: Ablauf Altfahrzeugrecycling	21
Abbildung 3.2: Inhalte der europäischen Altfahrzeugrichtlinie	24
Abbildung 4.1: Herausforderungen im Automobilbau	30
Abbildung 4.2: Konzept der Integrierten Produktentwicklung	31
Abbildung 4.3: Ablauf von Fahrzeugentwicklungsprojekten	32
Abbildung 4.4: Quality Gate Prinzip innerhalb der Fahrzeugentwicklung	36
Abbildung 4.5: Projektstrukturierung in der Automobilindustrie	37
Abbildung 4.6: Engineering Data Management in der Automobilindustrie	40
Abbildung 4.7: Recyclingbezogene Aufgaben bei der Entwicklung	42
Abbildung 4.8: Kreislaufeignung von Automobilkomponenten	47
Abbildung 4.9: Rückgewinnungsgraph	48
Abbildung 4.10: Analyse aktueller Stand recyclinggerechte Produktentwicklung	49
Abbildung 5.1: Bausteine der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung	52
Abbildung 5.2: Rückfluss von Recyclinginformationen für die PKW-Entwicklung	54
Abbildung 5.3: Aufgaben der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung	56
Abbildung 5.4: Vorgehensweise bei der Produktplanung	57
Abbildung 5.5: Aufbau des Recyclingreferenzmodelles	58
Abbildung 5.6: Entwicklung von Recyclingszenarien	61
Abbildung 5.7: Szenario Transfer am Beispiel Rohbau und Sitzanlage	62
Abbildung 5.8: Aufgabenschwerpunkte der Technologiephase	64
Abbildung 5.9: Aufgabenschwerpunkte der Fahrzeugphase	68
Abbildung 5.10: Bausteine des Recycling Problemlösezyklusses	71
Abbildung 5.11: Detaillierung der Ziele entlang des Entwicklungsprozesses	74
Abbildung 5.12: Bausteine des Planungsinstrumentes SIDORA	75

Abbildung 5.13: Strukturierung des Recyclingmodells	77
Abbildung 5.14: Systemsynthese	79
Abbildung 5.15: Systembewertung Demontagemodul	81
Abbildung 5.16: Detaillierung der Auswertung entlang des Entwicklungsprozesses	83
Abbildung 5.17: Datenpflege und Datenbearbeitung im Planungsinstrument	84
Abbildung 5.18: Produktstruktur, Werkstoff- und Gewichtsdaten in SIDORA	85
Abbildung 5.19: Aufbau des Produktmodelles in SIDORA	87
Abbildung 5.20: Demontagemodule am Beispiel Mittelklasse PKW	88
Abbildung 5.21: Aufbau des Demontagemodelles in SIDORA	89
Abbildung 5.22: Modellierung der Recyclingverfahren in SIDORA	91
Abbildung 5.23: Prozessschritte Produktrecycling - Motoraufarbeitung	94
Abbildung 5.24: Prozessschritte Materialrecycling - Stossfängeraufbereitung	95
Abbildung 5.25: Prozessschritte Materialrecycling - Restkarosse	96
Abbildung 5.26: Aufbau des Recyclingmodelles in SIDORA	97
Abbildung 5.27: Teilverbindungsgraph eines Demontagezustandes	99
Abbildung 5.28: Ergebnisprotokoll eines Demontagezustandes	99
Abbildung 5.29: Bewertungsmodul Gesamtfahrzeug	100
Abbildung 5.30: Verfahrensablauf zur Erstellung eines Verwertungskonzeptes	103
Abbildung 5.31: Projektaufgaben nach Zuständigkeit und Verantwortung	105
Abbildung 5.32: Einbindung des Recyclingteams in die PKW-Projektorganisation	108
Abbildung 6.1: Materialzusammensetzung Mittel-Klasse PKW	111
Abbildung 6.2: Recyclingszenarien am Beispiel eines Mittelklasse PKW	112
Abbildung 6.3: Ergebnisse der Recyclingszenarien	113
Abbildung 6.4: Materialzusammensetzung der Fahrzeugkonzepte	116
Abbildung 6.5: Ergebnisse Recyclingszenario 2 für die Fahrzeugkonzepte	117
Abbildung 6.6: Vergleich ausgewählter Demontagemodule	118
Abbildung 6.7: Kosten und Erlöse für ausgewählte Demontagemodule	119
Abbildung 6.8: Recyclinggerechte Konstruktion – Beispiel Stossfänger	122
Abbildung 6.9: Einsatz von Kunststoffrecyclaten	123
Abbildung 6.10: Recyclinggerechte Konstruktion – Beispiel Vorbehandlung	124
Abbildung 6.11: Recyclingkonzept neues Fahrzeugmodell	125
Abbildung 6.12: Dokumentation Recyclingkonzept - IDIS	126

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Reduzierung des Flottenverbrauchs, 3-Liter Autos sowie alternative Antriebskonzepte sind seit Jahren in der öffentlichen, politischen und technischen Diskussion. Häufig wird dabei vergessen, dass verbrauchsreduzierende Leichtbaumaßnahmen meist mit gestiegenem Energie- und Ressourcenverbrauch in der Herstellungsphase erkauft werden müssen und dass das Recycling am Lebensende eines Fahrzeugs erschwert wird.

Um die Umweltverträglichkeit eines Automobils zu optimieren, genügt es also nicht alleine den Kraftstoffverbrauch zu senken. Erst die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus “von der Wiege bis zur Bahre” und die Erfassung und Bewertung aller Stoffströme und Emissionen ermöglicht eine nachhaltige Reduzierung der Umweltbelastung. Dabei nimmt das Recycling von Automobilen eine wichtige Rolle ein, da durch das Schließen der Stoffkreisläufe die eingesetzten Materialien einer erneuten Nutzung zugeführt werden können und dadurch die Umwelt und Rohstoffressourcen gleichermaßen geschont werden.

Die gegenwärtige Form des Altfahrzeugrecyclings ist auf den Ausbau von marktfähigen Gebrauchtteilen und auf die Rückgewinnung der metallischen Werkstoffe ausgerichtet. Nach der Demontage des Fahrzeuges werden die Karossen mittels unterschiedlicher Zerkleinerungs- und Sortierprozesse in eine Stahl-, Shredderschwer- und Shredderleichtfraktion getrennt. Die so gewonnenen metallischen Werkstoffe finden in den gleichen Prozessen wie die Rohmaterialproduktion ihren Einsatz. Die derzeit nicht verwertbare Shredderleichtfraktion stellt ca. 25% des Shredderinputs dar und wird größtenteils auf Deponien abgelagert. Sie besteht hauptsächlich aus Kunststoffen, Gummi, Glas und weist Restmengen an Metallen und Betriebsstoffen auf. Alleine in Deutschland fallen jedes Jahr ca. 500.000 Tonnen Shredderleichtmüll an /PAS 00/.

Die Deponierung wird jedoch zunehmend problematischer. Steigende Entsorgungskosten durch knappe Deponieflächen, die Notwendigkeit der Schonung natürlicher Ressourcen sowie strenge gesetzliche Auflagen bei der Deponierung von Stoffen erfordern ein Umdenken der bisherigen Entsorgungspraxis (vgl. Kapitel 3.1.4).

Aufgrund der geschilderten Problematik wurden insbesondere in den letzten Jahren weltweit zahlreiche Aktivitäten und Gesetzesvorhaben zur Neuordnung der Altfahrzeugverwertung gestartet. Als ein wesentlicher Meilenstein kann dabei die Verabschiedung der europäischen Altfahrzeugrichtlinie im Jahre 2000 genannt werden /EG 00/. Gemeinsames Ziel der Konzepte ist, die flächendeckende Sammlung und umweltverträgliche Verwertung der Altfahrzeuge, sowie die Reduzierung der Menge und Schädlichkeit der entstehenden Abfallmengen.

Dabei kommt dem Fahrzeughersteller unter Wahrung seiner Produktverantwortung eine zentrale Rolle zu. Neben der Übernahme der Entsorgungskosten für die Altprodukte ist er verpflichtet bereits bei der Entwicklung der Fahrzeuge darauf hinzuwirken, dass die Verbesserung der Recyclingsituation langfristig sichergestellt werden kann.

Die Folge ist, dass die recyclinggerechte Gestaltung von Automobilen zukünftig für den Hersteller zu einem Bilanzfaktor wird. Nur durch die konsequente Berücksichtigung des späteren Recyclings innerhalb der Produktentwicklung können künftige Produktgenerationen in umweltgerechter und wirtschaftlicher Weise einer erneuten Nutzung zugeführt werden. Die Höhe ökologischer und ökonomischer Lasten des Produktrecyclings wird dabei weitgehend in der frühen Entwicklungsphase festgelegt. Korrekturen an der Produktgestaltung sind später nur noch unter hohem Aufwand zu realisieren. Je früher die Recyclerfordernisse in den Entwicklungsprozess integriert werden, desto größer ist der Nutzen hinsichtlich einer Minimierung von Umweltlasten und Kosten.

Zur Umsetzung der genannten Zielsetzungen innerhalb der Produktentwicklung wurden in der jüngeren Vergangenheit vielfach Methoden und Rechnerhilfsmittel entwickelt, die den Konstrukteur bei der Gestaltung des Produktes unterstützen sollen. Eine standardisierte Anwendung in der Industrie scheiterte jedoch meist an der mangelnden Kompatibilität mit den vorhandenen Konstruktionsdokumentationssystemen und an einer praktikablen und effizienten Einbindung der Recyclerfordernisse in den Entwicklungsprozess. Die vorhandenen Ansätze stellen zumeist Insellösungen dar, die weder methodisch noch instrumentell in den Produktentwicklungsablauf eingebunden sind.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ausgehend von der beschriebenen Problemsituation ist die Zielsetzung dieser Arbeit, Methoden und Werkzeuge zur recyclinggerechten Automobilentwicklung zu erarbeiten. Die Recyclinggerechtheit eines Automobils wird dabei im Rahmen dieser Arbeit definiert als Grad der Erfüllung von Zielen, die das Unternehmen aus Recyclingsicht an das Produkt stellt. Der Betrachtungsschwerpunkt lässt sich in folgende Teilaufgaben untergliedern:

- ❑ Die Entwicklung einer Planungsmethodik, welche die Ableitung von Recyclingzielen in den frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützt und in den nachfolgenden Phasen der Entwicklung konsequent verfolgt.
- ❑ Die Erarbeitung einer Organisationsstruktur, die eine lückenlose und effiziente Integration der recyclinggerechten Konstruktion in den Fahrzeugentwicklungsprozess sicherstellt.
- ❑ Den Aufbau eines Bewertungsinstrumentes zur rechnergestützten Ableitung der Demontage- und Recyclingmöglichkeiten eines Fahrzeuges, welches sowohl an die Planungsmethodik als auch an die Produktdokumentation gekoppelt ist.

Entsprechend den oben genannten Teilzielen der Arbeit wird deren Aufbau wie folgt strukturiert (siehe Abbildung 1.1).

In Kapitel 2 werden zunächst die allgemeinen Grundlagen und Definitionen des Recyclings technischer Produkte aufgezeigt und vor dem Hintergrund der dazugehörigen gesetzlichen Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft analysiert. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 die bisherige Entsorgungspraxis von Altfahrzeugen entlang den einzelnen Stationen des Verwertungsprozesses beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Analyse der aktuellen Rechtsvorschriften zur Neuordnung des Altfahrzeugrecyclings. Das Ergebnis dieses Schritts ist die Ableitung des Handlungsbedarfs für die Automobilindustrie zur Umsetzung der gesetzlichen Zielsetzungen.

In Kapitel 4 wird der Stand der Technik der recyclinggerechten Produktentwicklung aufgezeigt. Als Grundlage werden zunächst die angewandten Methoden, Hilfsmittel

und Organisationsstrukturen der Fahrzeugentwicklung beschrieben. Darauf aufbauend werden die aktuellen Ansätze zur Einbindung des Recyclings in die Produktentwicklungsprozesse analysiert und bewertet. Die Ermittlung der Anforderungen an eine aufzubauende Planungsmethodik schließt dieses Kapitel ab.

Das Gesamtkonzept zur Einbindung der Recyclerfordernisse in die Fahrzeugentwicklung wird in Kapitel 5 vorgestellt. Die Realisierung des Instrumentariums lässt sich in drei Arbeitsschritte gliedern. Im ersten Schritt erfolgt die Beschreibung des übergeordneten Vorgehensmodells zur Einbindung und Umsetzung der Recyclingziele entlang der Teiletappen der Fahrzeugentwicklung. Im zweiten Schritt wird gekoppelt an dieses Vorgehensmodell ein rechnergestützter Ablaufplan erstellt, welcher als formaler Vorgehensleitfaden angewandt wird. Im dritten Schritt wird eine Organisationsstruktur aufgezeigt, welche das erforderliche Recyclingwissen in die Fahrzeugentwicklungsprojekte optimal einbindet.

Kapitel 6 schließt diese Arbeit mit einem Anwendungsbeispiel für die entwickelten Methoden und Tools ab. Anhand eines Mittelklasse-PKW werden verschiedene Recyclingszenarien analysiert und die Umsetzung der daraus abgeleiteten Handlungsfelder für die recyclinggerechte Konstruktion vorgestellt.

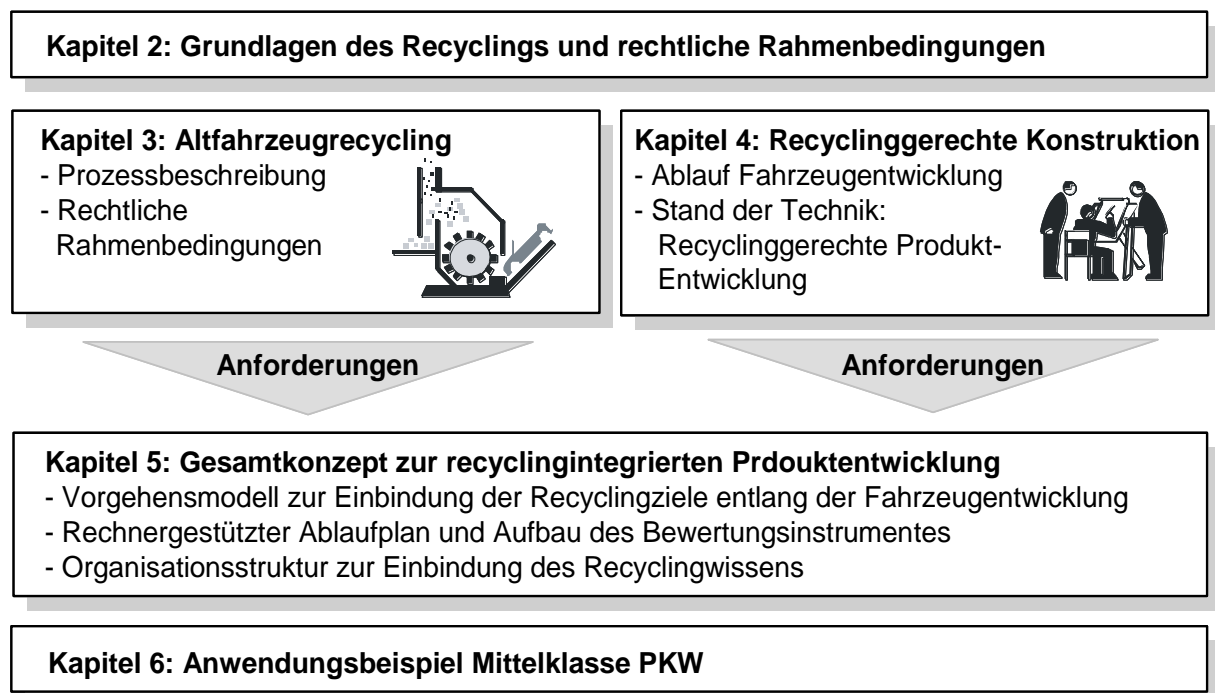


Abbildung 1.1: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen des Recyclings

Ziel dieses Kapitels ist es, die allgemeinen Grundlagen des Recyclings darzustellen. Ausgehend von den Begriffsbestimmungen und Definitionen zum Recycling von technischen Produkten werden die dazugehörigen gesetzlichen Rahmenbedingungen, soweit es für das Verständnis dieser Arbeit erforderlich ist, aufgezeigt. Die Betrachtungen gelten als Grundlage für die fallbezogenen Untersuchungen in Kapitel 3, in denen die Problematik des Recyclings anhand des Beispiels Altfahrzeugverwertung spezifiziert wird.

2.1 Begriffe und Definitionen zum Recycling

Aufgrund der Vielfalt der in der Literatur verwendeten Definitionen zum Recycling sollen zunächst die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe erläutert werden. Die Grundlage hierzu bildet die VDI-Richtlinie 2243 /VDI 93/. In ihr ist das Recycling technischer Produkte als *„die erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten oder Teilen von Produkten in Form von Kreisläufen“* definiert. Zur Einordnung der zum Recycling gehörenden Begriffe und Definitionen wird eine Klassifizierung nach Recycling-Kreislaufarten, Recycling-Formen und Recycling-Behandlungsprozessen vorgenommen.

2.1.1 Recycling-Kreislaufarten

Parallel zu den Phasen des Lebenszyklus eines technischen Produktes - Produktion, Gebrauch und Entsorgung - lassen sich die Recycling-Kreislaufarten in Produktionsabfall Recycling, Recycling während des Produktgebrauchs und Altstoffrecycling untergliedern (siehe Abbildung 2.1).

Unter Produktionsabfall-Recycling wird die Rückführung von Produktionsrückständen, sowie Hilfs- und Betriebsstoffen in einen neuen Produktionsprozess definiert. Diese Kreislaufart ist industriell bereits am weitesten verbreitet. Als Gründe hierfür ist neben den gestiegenen gesetzlichen Anforderungen in diesem Bereich (vgl. Kapitel 2.2.1) vor allem die Wirtschaftlichkeit der dort einsetzbaren Recyclingverfahren zu nennen. Die Rückführung von gebrauchten Produkten in ein neues Gebrauchsstadium wird als Recycling während des Produktgebrauchs definiert. Da sich hierbei die Produktgestalt nicht verändert, spricht man bei dieser

Kreislaufart auch von Produktrecycling. Beim Altstoff-Recycling werden verbrauchte Produkte, bzw. Altstoffe in einen neuen Produktionsprozess zurückgeführt. Da sowohl das Altstoff-, als auch das Produktionsabfall-Recycling auf die Rückgewinnung der Werkstoffe ausgerichtet sind, spricht man bei diesen Kreislaufarten auch von Materialrecycling.

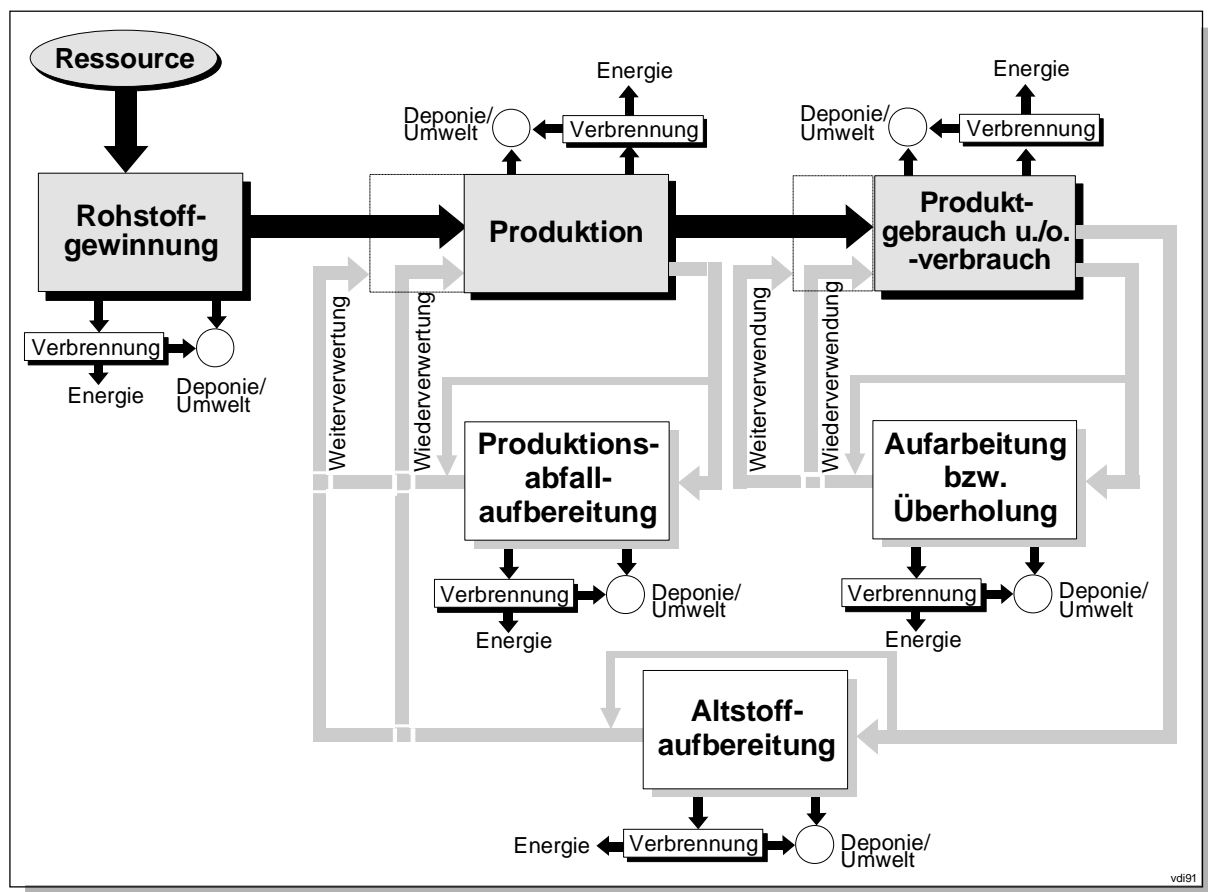


Abbildung 2.1: Recyclingmöglichkeiten im Produktlebenszyklus /VDI 93/

Die für ein entsprechendes Produkt- oder Materialrecycling nicht mehr verwend- bzw. verwertbaren Stoffe enden entweder direkt auf der Deponie oder werden durch Verbrennung zur Energiegewinnung genutzt.

2.1.2 Recycling-Formen

Innerhalb der beschriebenen Kreisläufe sind verschiedene Recycling-Formen anwendbar. Je nach Kreislaufart wird zwischen einer Verwendung oder Verwertung unterschieden.

Die Verwendung ist durch die Beibehaltung der ursprünglichen Produktgestalt gekennzeichnet. Wird das Produkt für den gleichen Verwendungszweck wie zuvor eingesetzt, so spricht man von Wiederverwendung¹. Als Weiterverwendung² dagegen bezeichnet man die erneute Nutzung eines gebrauchten Produktes für einen Zweck, für den es ursprünglich nicht hergestellt wurde.

Im Gegensatz zur Verwendung löst die Verwertung die Produktgestalt auf. Das Ziel ist es, die im Produkt enthaltenen Werkstoffe auf möglichst hohem Qualitätsniveau zurück zu gewinnen. Werden die Altstoffe und Produktionsabfälle in einem gleichartigen Produktionsprozess wie dem bereits durchlaufenen eingesetzt, so spricht man von Wiederverwertung³. Aus den Ausgangsstoffen entstehen somit qualitativ gleichwertige Werkstoffe. Als Weiterverwertung⁴ wird dementsprechend der Einsatz dieser Stoffe in einem von diesem noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess verstanden.

Generell ist die Verwendung aus ökologischer und ökonomischer Sicht einer Verwertung vorzuziehen, da das hohe Wertniveau des Produktes bei dieser Recycling-Form erhalten bleibt. Dagegen geht mit der Auflösung der Produktgestalt bei der Verwertung ein hoher Teil des Herstellaufwandes verloren.

2.1.3 Recycling-Behandlungsprozesse

Vor einer erneuten Verwendung oder Verwertung, müssen die einem Recyclingkreislauf zugeordneten Produkte oder Stoffe in der Regel einen geeigneten Recycling-Behandlungsprozess durchlaufen. Zur Vorbereitung der eigentlichen Verwertung von Altstoffen oder Produktionsabfällen beim Materialrecycling werden entsprechende verfahrenstechnische Aufbereitungsprozesse eingesetzt. Im Gegensatz dazu werden beim Produktrecycling zur Wiederherstellung der Produktgestalt bzw. der Produkteigenschaften fertigungstechnische Aufarbeitungsprozesse eingesetzt. Der erste Schritt bei beiden Recyclingarten ist in der Regel die Demontage des Altproduktes. Erst danach folgen die eigentlichen Aufarbeitungs- bzw. Aufbereitungsprozesse. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die Demontage als eigenständigen vorbereitenden Prozess zu betrachten. Im Folgenden

¹ z.B. Pfandflaschen, Reifenrunderneuerung, KFZ-Austauschmotor.

² z.B. Einkaufstüte als Müllbeutel, Eisenbahnschwelle als Zaunpfahl, Altreifen als Kinderschaukel.

³ z.B. Umschmelzen von Angüssen in Produktion, Altglas, Drehspäne, Altpapier.

⁴ z.B. Elastomere als Sportbelagzusatz, gemischte Kunststoffe als Schallschutzwand.

werden die typischen Prozessketten des Produkt- bzw. Materialrecyclings von Altprodukten/-stoffen näher erläutert. Bezüglich des Recyclings von Produktionsabfällen als Materialrecycling unter vereinfachten Bedingungen sei auf die VDI-Richtlinie 2243 /VDI 93/ verwiesen.

Demontageprozesse:

Der Begriff Demontage wird definiert als die Gesamtheit aller Vorgänge, die den Zusammenhalt von geometrisch bestimmten Körpern auflösen /TRI 97/. In Analogie zur Montage besteht ein Demontageprozess aus einer Folge von verschiedenen Teilfunktionen. Neben der Hauptfunktion Trennen sind zur Durchführung eines Demontageprozesses Nebenfunktionen wie Bereitstellen der Demontageobjekte, Handhaben der Demontagewerkzeuge, Abführen und Sortieren der demontierten Bauteile bzw. Werkstoffgruppen erforderlich (siehe Abbildung 2.2). Die einzelnen Teilfunktionen werden nach Brinkmann /BRI 94/ wie folgt definiert:

- ☐ Bereitstellen der Demontageobjekte bezeichnet alle Vorgänge, die zur lagegerechten Positionierung der zu demontierenden Bauteile erforderlich sind. Das Bauteil muss so angeordnet werden, dass die Zugänglichkeit für die jeweiligen Demontagewerkzeuge sichergestellt ist.
- ☐ Das Handhaben von Demontagewerkzeugen umfasst die Heranführung der notwendigen Demontagewerkzeuge, z.B. Schraubendreher, Greifwerkzeuge an das Demontageobjekt bzw. an die zu lösende Verbindung und, nach erfolgter Trennung des Produktzusammenhaltes, das Abführen des Werkzeuges.
- ☐ Unter der Hauptfunktion Trennen sind die nach DIN 8580 /DIN 8580/ definierten Prozesse zusammengefasst. Neben dem Abtragen und Reinigen ist das Fertigungsverfahren Trennen in Zerlegen, Zerteilen und Spanen mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide unterteilt.
- ☐ Die demontierten Bauteile bzw. Werkstoffe sind möglichst weitgehend nach unterschiedlichen Bauteil- oder Werkstoffgruppen zu sortieren und in entsprechende Behälter abzuführen.

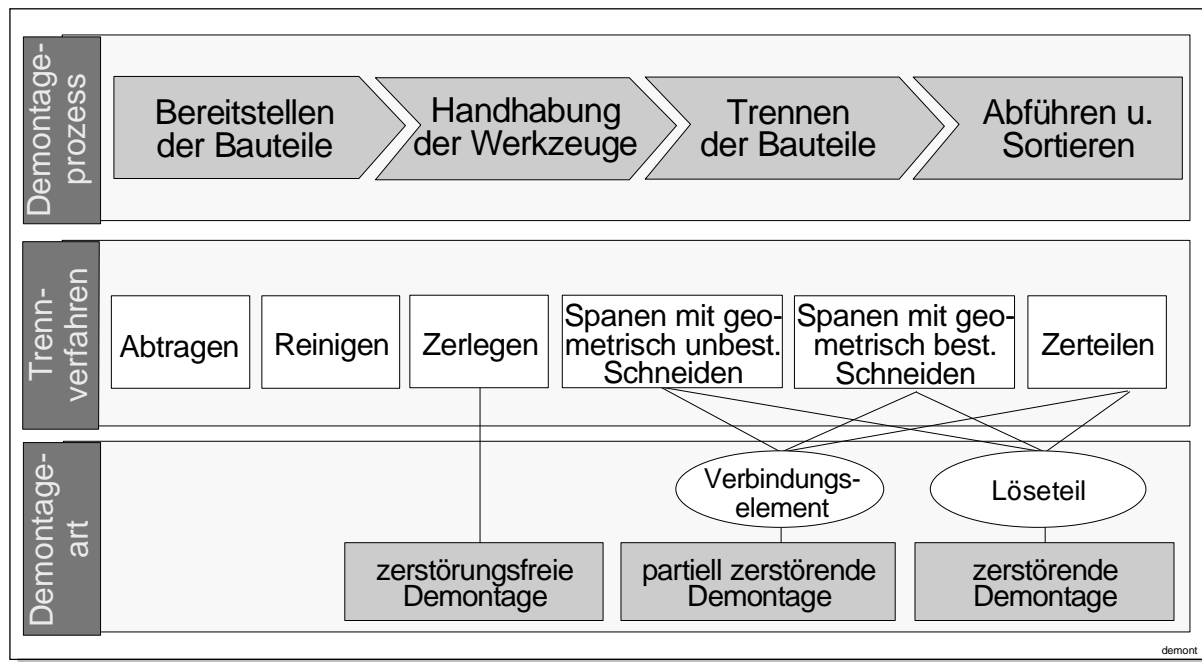


Abbildung 2.2: Teilschritte des Demontageprozesses

Entsprechend den eingesetzten Trennverfahren können die Demontageprozesse klassifiziert werden in:

- ☐ zerstörungsfreie,
- ☐ partiell zerstörende und
- ☐ zerstörende Demontageprozesse.

Bei der Durchführung einer zerstörungsfreien Demontage werden die nach DIN 8591 /DIN 8591/ definierten Prozesse des Zerlegens zugrunde gelegt. Hierzu gehören Tätigkeiten wie z.B. Abschrauben, Abnehmen, Aufdrehen, Entleeren, Ablöten. Sie stellen im Wesentlichen eine direkte Umkehrung der jeweiligen Fügeprozesse bei der Produktmontage dar. Zerstörungsfreie Demontageprozesse werden primär dann eingesetzt, wenn das zu demontierende Bauteil bzw. Material einem hochwertigen Recycling, d.h. Wieder-/Weiterverwendung des Bauteiles oder möglichst sortenreine Gewinnung von Materialfraktionen zur Verwertung, zugeführt werden soll.

Zur Durchführung einer partiell zerstörenden Demontage werden die Prozesse des Spanens und Zerteilens eingesetzt. Bei der partiell zerstörenden Demontage werden lediglich die Verbindungselemente zerstört, z.B. Aufbohren von Nietverbindungen. Im Gegensatz hierzu werden bei zerstörenden Demontageprozessen neben den

Verbindungselementen auch die Bauteile beschädigt. Partiiell-/zerstörende Demontageprozesse werden vor allem bei Verbindungselementen, die nach der Nutzungsdauer nicht mehr lösbar sind eingesetzt.

Aufarbeitungsprozesse:

Das Ziel des Aufarbeitungsprozesses ist die Bewahrung oder Wiederherstellung der durch den Gebrauch verminderten Funktionseigenschaften eines Produktes. Dabei durchläuft das Produkt die in Abbildung 2.3 dargestellten Teilschritte.

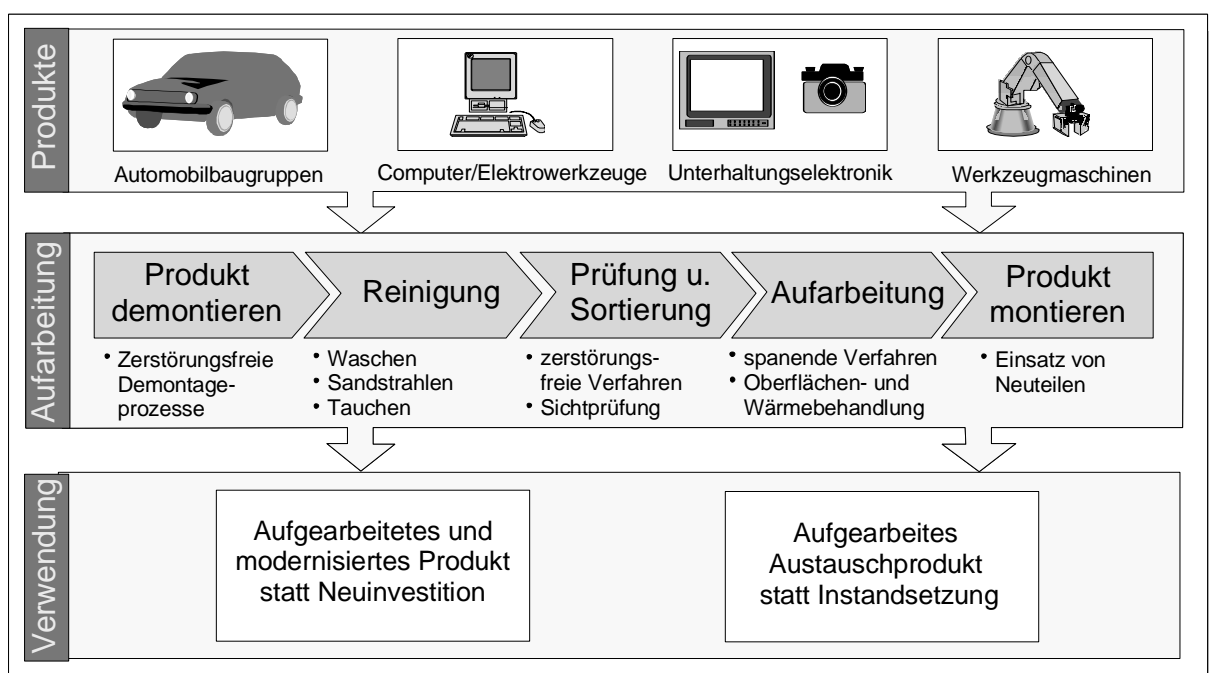


Abbildung 2.3: Teilschritte der Aufarbeitung

Im ersten Schritt erfolgt eine zumeist zerstörungsfreie Demontage des Produktes. Die Demontage wird zumeist manuell und unter Einsatz mechanisierter Werkzeuge (Druckluftschrauber, etc.) durchgeführt. Nach dem Reinigen und Sortieren der Bauteile erfolgt die eigentliche Teilaufarbeitung. Hierbei kommen vorwiegend spanende Fertigungsverfahren (z.B. Drehen, Fräsen) und Oberflächen behandelnde Verfahren (z.B. Lackieren) zum Einsatz. Das Ziel der Aufarbeitung ist es, die Abnutzung eines Produktes wieder auf den Neuzustand oder sogar einen modernisierten Zustand zu bringen. Dies unterscheidet die Aufarbeitung auch prinzipiell von der Instandsetzung, die lediglich auf die Bewahrung bzw. Wiederherstellung eines gewissen Sollzustandes (Wartung) abzielt. Letzter Schritt

ist die Remontage der einzelnen aufgearbeiteten oder zum Teil auch neuen Bauteile zu einem so genannten Austauschprodukt.

Die industrielle Umsetzung erfolgt in der so genannten Austauscherzeugnisfertigung. Neben Anwendungen aus Automobil- und Elektroindustrie /BEH 96, HIL 91, KOE 96, KUR 95, SCH 95, SCH 95-1, ULR 91/ kommen Aufarbeitungsprozesse besonders bei langlebigen Investitionsgütern, wie z.B. Werkzeugmaschinen zum Einsatz. Durch eine gezielte Modernisierung der Maschinen, wie z.B. Nachrüstung einer CNC-Steuerung, kann sogar eine Erhöhung des Wertniveaus erreicht werden (Upcycling).

Aufbereitungsprozesse:

Ziel des Aufbereitungsprozesses ist es, die in den Produkten enthaltenen Materialien als Werkstoffe gleicher Qualität oder gegebenenfalls mit veränderten Eigenschaften zurück zu gewinnen. Um die in der Regel aus einem Werkstoffmix bestehenden Produkte einem hochwertigen Materialrecycling zuführen zu können, ist eine Verfahrenskette unterschiedlicher Prozessschritte notwendig /LÖH 95, NIC 96/. Die einzelnen Teilschritte sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

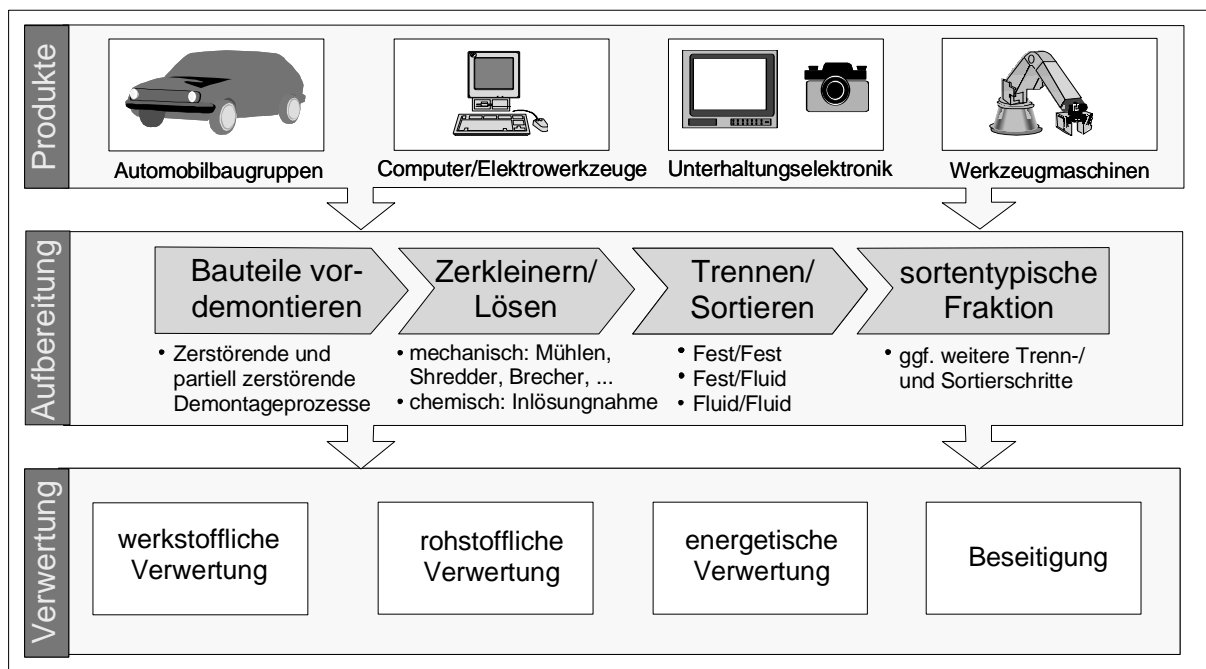


Abbildung 2.4: Teilschritte der Aufbereitung

Nach der Demontage von schadstoffhaltigen Bauteilen wird der noch bestehende Produktverbund mittels mechanischen Zerkleinerungsverfahren aufgetrennt. Häufig eingesetzte Zerkleinerungsmaschinen sind z.B. Shredder, Prall- und Hammermühlen. Der erhaltene Materialmix wird mit Hilfe verschiedener Sortierverfahren unter Ausnutzung der unterschiedlichen physikalischen Materialeigenschaften in einzelne Fraktionen getrennt. In der Praxis wird oftmals eine Kaskade von unterschiedlichen Sortierverfahren wie Magnetabscheider, Schwimm-Sink-Anlagen oder Wirbelstromabscheider eingesetzt. Anschließend werden die verschiedenen Fraktionen in werkstofflichen, rohstofflichen oder energetischen Prozessen wieder- oder weiterverwertet.

Die stoffliche Verwertung von Metallen ist zum größten Teil identisch mit den Verfahren der Rohmaterialerzeugung. Die entsprechenden Metall-Schrottsorten werden durch Einschmelzen in Stahl-, Kupfer- oder Aluminiumhütten im Kreislauf geführt /BDS 84, HAB 94, FAT 82/. Aufgrund der unterschiedlichen Trennschärfen der vorgeschalteten Sortierprozesse sind die einzelnen Fraktionen zum Teil mit erheblichen Verunreinigungen befrachtet. Zur Sicherung der Qualität der Rohmaterialproduktion werden die zu verarbeitenden Schrotte in so genannten Schrottklassen eingeteilt.

Zur Verwertung von Kunststoffen existieren drei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten: das werkstoffliche Recycling, das rohstoffliche Recycling und das energetische Recycling durch Verbrennung.

Das werkstoffliche Recycling kennzeichnet sich dadurch, dass die chemische Struktur des Kunststoffes unverändert bleibt. Bei Thermoplasten werden nach der Verbundtrennung und Sortierung die einzelnen Fraktionen durch Granulieren zu neuen Ausgangswerkstoffen verarbeitet. Die Granulierung erfolgt praktisch ausschließlich mit Extrudern (Schneckenmaschinen) verschiedener Konstruktion. Beim Granulationsprozess, der immer über den schmelzflüssigen Zustand abläuft, kann man die Kunststoffe reinigen oder mit Hilfsstoffen versetzen. Duroplaste lassen sich nicht umschmelzen. Das werkstoffliche Recycling beschränkt sich daher auf die Weiterverarbeitung von Mahlgut (Partikelrecycling).

Das rohstoffliche oder chemische Recycling kann sowohl für Thermoplaste als auch für Duroplaste eingesetzt werden. Mittels unterschiedlicher chemischer Verfahren

werden die niedermolekulare Bausteine aus den Makromolekülen der Kunststoffe abgespalten und in dieser Form den Stoffkreisläufen der chemischen Technik zugeführt. Unter dem Begriff chemisches Recycling werden die Verfahren Hydrolyse, Alkoholyse, Hydrierung, Vergasung und Pyrolyse zusammengefasst /MIC 93/.

Beim energetischen Recycling wird auf eine stoffliche Verwertung verzichtet und nur der Energiegehalt der Kunststoffe bei der Verbrennung genutzt. Der Heizwert von Kunststoffen liegt mit etwa 35 MJ/kg so hoch wie bei fossilen Brennstoffen. Im Gegensatz zur Verbrennung von Kohle und Öl ist aber nicht die Energiegewinnung primäres Ziel, sondern die Verminderung der Abfallvolumina. Bei der Verbrennung der Kunststoffe werden die organischen Bestandteile zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert. Gleichzeitig können jedoch auch Schadstoffe entstehen bzw. freigesetzt werden. Industrielle Verfahren und Anlagen zum werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Recycling von Kunststoffen sind bereits vielfältig vorhanden, so dass an dieser Stelle lediglich auf weiterführende Literatur verwiesen wird /BRE 92, NIC 96, MEN 92, WOL 97, JUN 94/.

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen des Recyclings

Grundlage für die Schließung der beschriebenen Recyclingkreisläufe ist die Schaffung der entsprechenden Rahmenbedingungen durch die Gesellschaft, Industrie und Staat. Im Zentrum steht der Staat mit seinen in der Öffentlichkeit verkündeten Zielen zum Schutz von Natur und Menschheit und in dem Bestreben, mit seinen Instrumenten den formellen rechtlichen Rahmen für den Umweltschutz zu setzen. Hierzu gehören neben dem öffentlichen Umweltrecht auch das Umweltprivat- und Umweltstrafrecht (siehe Abbildung 2.5).

Das öffentliche Umweltrecht umfasst alle Umweltgesetze und -verordnungen, wie beispielsweise das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und das Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Die Gesetze werden ergänzt durch eine Vielzahl von Verwaltungsvorschriften, wie etwa die Technische Anleitung Luft (TA Luft) oder die Technische Anleitung Lärm (TA Lärm). Diese Vorschriften stellen eine allgemeingültige Anleitung zur Auslegung der Umweltgesetze dar und bieten konkret umzusetzende Vorgaben. Zum öffentlichen Umweltrecht (allgemeiner Teil) gehören beispielsweise auch das Umweltinformationsgesetz und das Gesetz über die

Umweltverträglichkeitsprüfung, das eine frühzeitige Untersuchung und Beurteilung der Umweltauswirkungen von Industrieanlagen sicherstellt.

Der im Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB) formulierte Teil des privaten Umweltrechts zielt vor allem auf den Schutz des Einzelnen vor Umweltbelastungen und –schäden. Es ist jedoch durch die Regelungen im öffentlichen Umweltrecht mehr und mehr in den Hintergrund getreten. Das zu der Gruppe des sonstigen Umweltrechts gehörende Umweltstrafrecht spielt jedoch nach wie vor eine bedeutende Rolle. Es stellt die Verschmutzung oder Zerstörung unserer Lebensgrundlagen wie Wasser, Luft und Boden unter Strafe.

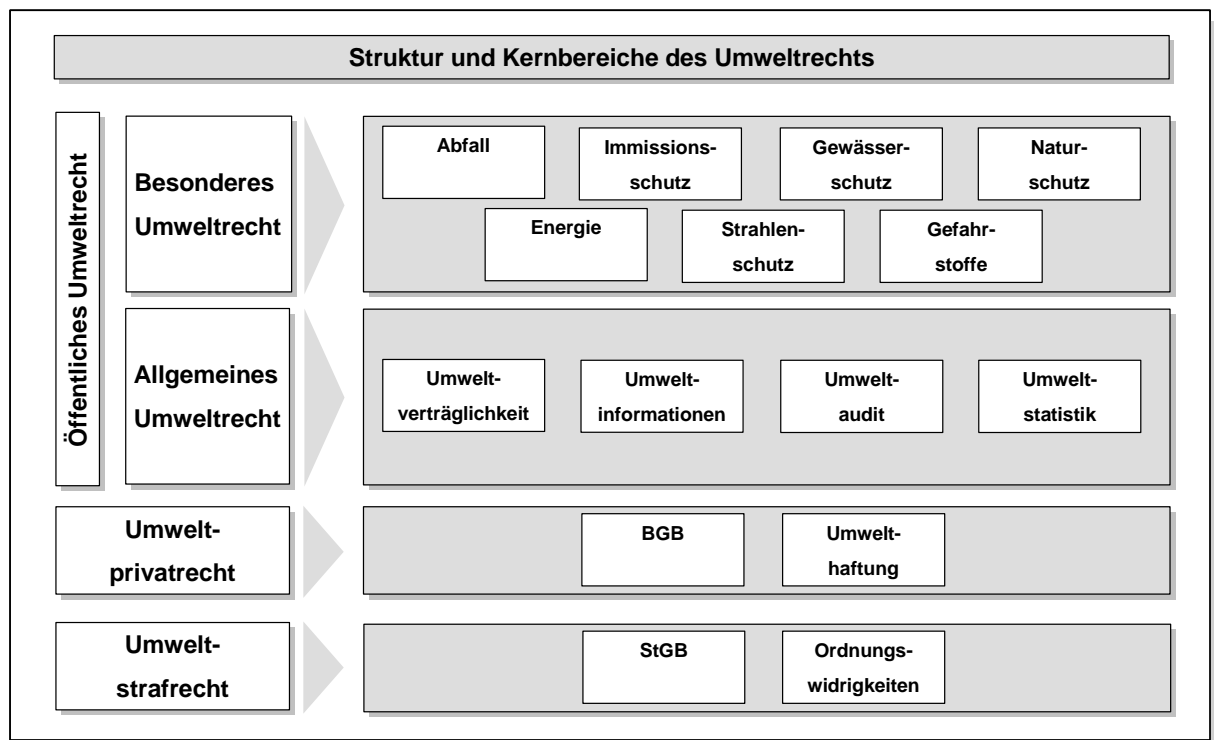


Abbildung 2.5: Struktur und Kernbereiche des Umweltrechts /IBU 05/

Der Bereich der Abfallwirtschaft wird auf europäischer Ebene durch die Abfallrahmenrichtlinie 91/156/EWG /EWG 91/ und auf Bundesebene durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) /BMU 94/ geregelt. Nach einer kurzen Einführung in die europäischen Rechtsgrundlagen der Abfallgesetzgebung werden im Folgenden die Inhalte des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes als zentraler Bestandteil der Abfallwirtschaft in Deutschland vorgestellt.

2.2.1 Abfallpolitik der Europäischen Union

Die europäische Umweltpolitik geht auf eine Konferenz der Regierungschefs im Oktober 1972 zurück. Hier wurde erstmals die Notwendigkeit einer gemeinschaftlichen Umweltpolitik festgelegt. In den folgenden zwei Jahrzehnten sind zur Konkretisierung dieser Zielkonzeption zahlreiche Rechtsakte von der Gemeinschaft erlassen worden.

Die allgemeinen Ziele der europäischen Initiative sind: *„the protection and preservation of environment quality, the protection of human health and the prudent and efficient use of natural resources for a sustainable development.“* /WAG 95/. Die Aktivitäten der Europäischen Gemeinschaft werden wesentlich von den Zielvorgaben geprägt, die maßgebend durch so genannte Aktionsprogramme⁵ festgestellt worden sind und fortgeschrieben werden. Für die Abfallpolitik, als Teil der Umweltpolitik, wurde zur Umsetzung der Ziele 1991 ein neuer Rahmen für die Abfallentsorgung in Form der so genannten EU-Abfallrahmenrichtlinie 91/156/EWG /EWG 91/ festgeschrieben. Die wesentlichen Regelungen sind folgende:

- ❑ Kernpunkt der Richtlinie ist die neuartige Definition des Begriffes Abfall. Als Abfälle werden demnach alle Stoffe oder Gegenstände bezeichnet, deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Eine nähere Ausführung, welche Stoffe als Abfälle bezeichnet werden, ist im European Waste Catalogue festgeschrieben /EG 93, SCH 95-2/.
- ❑ Zur Erreichung eines hohen Umweltschutzniveaus haben die Mitgliedstaaten nicht nur für eine verantwortungsvolle Beseitigung und Verwertung der Abfälle zu sorgen, sondern auch Maßnahmen zu treffen, die das Entstehen von Abfällen begrenzen und zwar insbesondere durch die Förderung sauberer Technologien, die technische Entwicklung und das Inverkehrbringen von umweltfreundlichen Produkten und die Entwicklung geeigneter Techniken zur Beseitigung gefährlicher Stoffe in Abfällen (Artikel 3).

⁵ Bisher wurden sechs Aktionsprogramme verbindlich festgelegt. Während die ersten vier Aktionsprogramme wesentlich durch Rechtsvorschriften der EU umgesetzt werden mussten, richtet sich das fünfte und sechste Aktionsprogramm auch unmittelbar an die Öffentlichkeit. Es zielt hauptsächlich auf Veränderungen im Verhalten der Gesellschaft. Vgl. hierzu Wagner /WAG 95/.

- ❑ Die Abfälle müssen verwertet oder beseitigt werden, ohne dass die menschliche Gesundheit gefährdet wird und ohne dass Verfahren verwendet werden, welche die Umwelt schädigen können (Artikel 4).
- ❑ Die Gemeinschaft soll Schritte realisieren, um eine Entsorgungsautarkie zu erreichen, die von jedem einzelnen Mitgliedstaat anzustreben ist. Für die Entsorgung wird dabei auf das Prinzip der Nähe gesetzt. Das bedeutet, dass Abfälle in der am nächsten gelegenen geeigneten Entsorgungsanlage entsorgt werden sollen (Artikel 5).
- ❑ Damit die oben genannten Ziele erreicht werden, sollen die Mitgliedsstaaten Abfallbewirtschaftungspläne⁶ erstellen.
- ❑ Um die Zielvorgaben wirkungsvoll durchsetzen zu können, sind die Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen zu verbessern. Weiterhin soll ein Ausschuss gegründet werden, der den Stand der Technik fortentwickelt.

Die Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht hätte bis zum 01.04.1993 erfolgen müssen. In dem bis dahin in Deutschland geltenden Abfallgesetz von 1986 /BMU 86/ wurde insbesondere der Abfallbegriff⁷ nicht ausreichend umgesetzt. Für die Bundesregierung ergab sich somit als Konsequenz, das bestehende Abfallgesetz zu ändern und mit der EU-Richtlinie zu harmonisieren. Im Rahmen der 5. Novellierung des Abfallgesetzes wurde dem Rechnung getragen. Am 08.07.1994 wurde das neue so genannte Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom Bundesrat verabschiedet und trat nach einer Übergangszeit von zwei Jahren nach der Verkündung in Kraft.

⁶ Abfallbewirtschaftungspläne beinhalten insbesondere Daten über die Art, Menge und den Ursprung der zu verwertenden Abfälle, allgemeine technische Vorschriften, besondere Vorkehrungen für bestimmte Abfälle und geeignete Flächen für Deponien und sonstige Beseitigungsanlagen.

⁷ nach §1 des alten Abfallgesetzes sind Abfälle bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will oder deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt geboten ist. Hierbei wurde zwischen dem objektiven Abfallbegriff (eine Sache ist zu entsorgen) und dem subjektiven Abfallbegriff (der Letztbesitzer entscheidet ob eine Sache entsorgt werden soll) unterschieden. Aus dieser rechtlichen Formulierung entstanden immer dann Probleme, wenn der Letztbesitzer die objektive Notwendigkeit der Entsorgung bestritt /KOE 97/.

2.2.2 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz verfolgt den Zweck die Kreislaufwirtschaft zu fördern, um natürliche Ressourcen zu schonen und eine umweltverträgliche Beseitigung von Abfällen sicher zu stellen (§1 KrW-/AbfG). Zusätzlich wurde das Ziel verfolgt, die aus der Interpretation des Abfallgesetzes entstandenen Widersprüche zu anderen Gesetzen, insbesondere die EU-Abfallrahmenrichtlinie 91/156/EWG, zu beseitigen.

Die Vorschriften des Gesetzes gelten insbesondere für die Vermeidung, die Verwertung und die Beseitigung von Abfällen. Die wesentliche formelle Neuerung war die Übernahme des in der EU-Richtlinie enthaltenen Abfallbegriffs (vgl. Kapitel 2.2.1). Damit diese Abfalldefinition nicht wieder im Sinne des alten subjektiven Abfallbegriffs ausgedeutet werden kann, hat der Gesetzgeber in §3 Absatz 2 bis 4 KrW-/AbfG die Entledigung, den Willen zur Entledigung sowie das Muss dazu so objektiv wie möglich beschrieben.

- ☐ Die Entledigung liegt vor, wenn der Besitzer bewegliche Sachen einer Beseitigung oder einer Verwertung im Sinne des Anhangs IIA, bzw. IIB des KrW-/AbfG zuführt /BMU 94, KOE 97/.
- ☐ Der Wille zur Entledigung ist hinsichtlich solcher Sachen anzunehmen, die bei der Energieumwandlung, Herstellung, Behandlung oder Nutzung von Stoffen anfallen, ohne dass der Zweck der jeweiligen Handlung darauf gerichtet ist, oder deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt.
- ☐ Der Besitzer muss sich beweglichen Sachen entledigen, wenn diese entsprechend ihrer ursprünglichen Zweckbestimmung nicht mehr verwendet werden. Für die Beurteilung der Zweckbestimmung ist die Auffassung des Erzeugers oder Besitzers unter Berücksichtigung der Verkehrsanschauung zugrunde zu legen.

Bei der Behandlung von Abfällen strebt das KrW-/AbfG die grundsätzliche Zielhierarchie -Vermeidung vor Verwertung vor Beseitigung- an. Nach §4 KrW-/AbfG sind Abfälle in erster Linie zu vermeiden, insbesondere durch die Verminderung ihrer

Menge oder Schädlichkeit, und in zweiter Linie stofflich oder energetisch zu verwerten. Die Beseitigung von Abfällen wird durch §5 Absatz 2 KrW-/AbfG grundsätzlich der Verwertung nachgeordnet.

Als konkrete Vermeidungsmaßnahme nennt der Gesetzgeber in §4 Absatz 2 des KrW-/AbfG unter anderem die anlageninterne Kreislaufführung von Stoffen, die abfallarme Produktgestaltung sowie ein auf den Erwerb abfall- und schadstoffarmer Produkte ausgerichtetes Konsumverhalten.

Bei der Verwertung von Abfällen unterscheidet der Gesetzgeber die stoffliche und die energetische Verwertung und räumt der umweltverträglicheren Verwertungsart den Vorrang ein. Als Kriterien zur Bestimmung der umweltverträglicheren Verwertungsart sind die zu erwartenden Emissionen, die Schonung der natürlichen Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie, sowie die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, Abfällen zur Verwertung oder daraus gewonnenen Erzeugnissen zu berücksichtigen (siehe Abbildung 2.6).

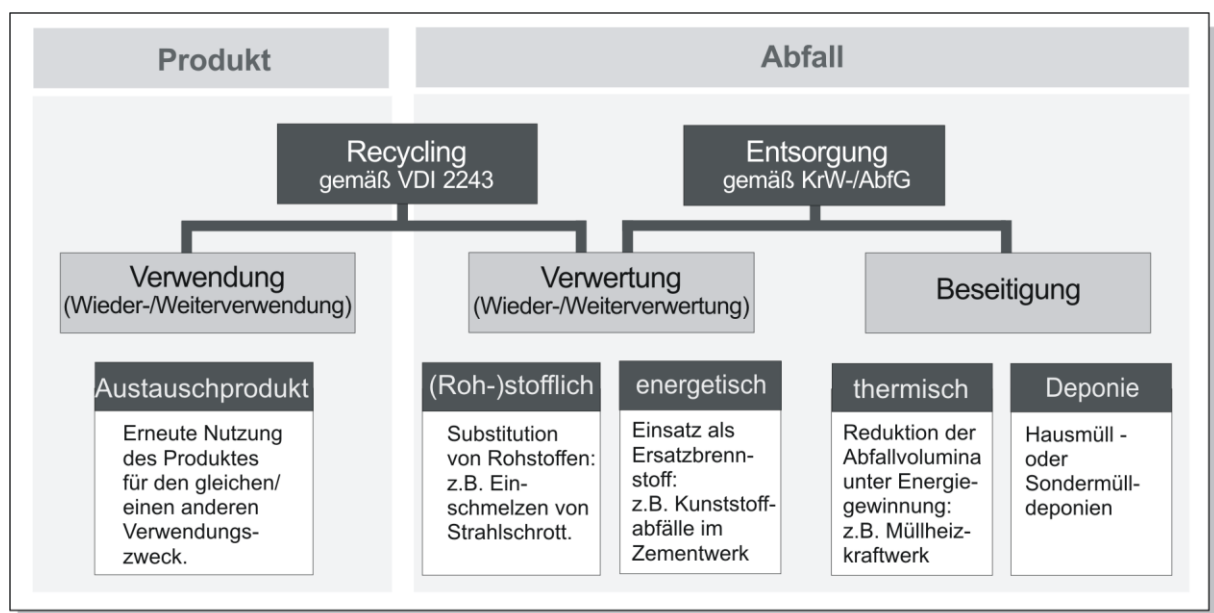


Abbildung 2.6: Begriffsbestimmungen zum Recycling /BMU 94, VDI 93/

Die energetische Verwertung soll insbesondere immer dann zugelassen sein, wenn Primärstoffe durch Abfälle zur Verwertung substituiert werden, diese Abfälle einen vergleichbaren Heizwert wie Primärbrennstoffe aufweisen⁸, der Verbrennungs-

⁸Der Heizwert des einzelnen Stoffes, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, muss mindestens 11 Megajoule je Kilogramm betragen.

prozess mit vertretbarem Wirkungsgrad abläuft⁹ und vor allem die erzeugte Energie auch tatsächlich genutzt wird. Die thermische Abfallbehandlung mit dem Ziel der Reduktion der Abfallvolumina bleibt dagegen als Beseitigungsverfahren klar abgegrenzt.

Die Ziele der Kreislaufwirtschaft sollen durch die Einführung einer neuen Produktverantwortung erfüllt werden. Nach §22 Absatz 1 KrW-/AbfG trägt derjenige, der Erzeugnisse entwickelt und herstellt, die Produktverantwortung. Aus diesem Grunde sind Erzeugnisse möglichst so zu gestalten, dass bei deren Herstellung und Gebrauch das Entstehen von Abfällen verhindert wird und die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung der nach Gebrauch entstehenden Abfälle sichergestellt ist.

Die Produktverantwortung umfasst nach §22 Absatz 2 KrW-/AbfG insbesondere die Entwicklung, Herstellung und das Inverkehrbringen von mehrfach verwendbaren und technisch langlebigen Erzeugnissen, den vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen bei der Herstellung von Erzeugnissen und die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch verbleibenden Abfälle sowie deren Entsorgung.

Diese Regelungen der Produktverantwortung können jedoch nicht ohne konkretisierende Rechtsvorschriften erzwungen werden. Hierzu wird der Gesetzgeber im Rahmen von §24 ermächtigt. Nach Anhörung der beteiligten Kreise kann der Gesetzgeber die Rücknahme- und Rückgabepflichten in Form von entsprechenden Rechtsverordnungen regeln. Darüber hinaus kann die Bundesregierung nach §25 neben Rechtsverordnungen Zielfestlegungen für die freiwillige Rücknahme von Abfällen treffen. Sie sollen den Betroffenen Gelegenheit einräumen, sich rechtzeitig auf Entwicklungen einzustellen und gegebenenfalls Verordnungen durch freiwillige Selbstverpflichtungen entbehrlich machen. Entsprechend der Produktverantwortung des Herstellers gibt es inzwischen Verordnungen für Verpackungen, für Batterien, für Elektro- und Elektronikgeräte, für Altfahrzeuge und für Altöl. Selbstverpflichtungen der Wirtschaft, so für Altpapier oder Baureststoffe, kommen hinzu.

⁹Der Feuerungswirkungsgrad muss mindestens 75% betragen.

3 Altfahrzeugrecycling

Aufbauend auf den allgemeinen Grundlagen und rechtlichen Rahmenbedingungen des Recyclings von technischen Produkten wird im folgenden Kapitel das Altfahrzeugrecycling als Fallbeispiel dieser Arbeit näher betrachtet. In Kapitel 3.1 wird zunächst die bisherige Entsorgungspraxis von Altfahrzeugen beschrieben. Dazu werden die einzelnen Stationen des Verwertungsprozesses aufgezeigt und die damit verbundenen Problembereiche beleuchtet. In Kapitel 3.2 werden die aktuellen Rechtsvorschriften zur Neuordnung des Altfahrzeugrecyclings vorgestellt. Der sich daraus ergebende Handlungsbedarf für die Entwicklung von Automobilen wird in Kapitel 3.3 zusammengefasst.

3.1 Aktueller Stand des Altfahrzeugrecyclings

3.1.1 Ablauf des Altfahrzeugrecyclings

Die gegenwärtige Form des Altfahrzeugrecyclings ist auf den Ausbau von marktfähigen Gebrauchtteilen und auf die Rückgewinnung der metallischen Werkstoffe ausgerichtet. Die Hauptbeteiligten an dem Prozess sind Altautoverwerter, Shredderbetriebe, Stahlindustrie, sowie diverse Aufbereitungs-, Aufarbeitungs- und Entsorgungsbetriebe /HAH 98, HAE 94, KUR 94, KUR 95/.

Das Fahrzeug wird in der Regel vom Letztbesitzer bei einem Altfahrzeugverwerter abgegeben. Je nach Alter, Typ und Zustand des Fahrzeuges erhält der Besitzer eine Vergütung oder muss einen Betrag für die Entsorgung des Fahrzeuges entrichten. Der Altautoverwerter legt anschließend das Fahrzeug trocken¹⁰ und demontiert primär die Bauteile, welche auf dem Gebrauchtteilemarkt verkauft werden können. Bevorzugt werden diese Teile aus Unfallfahrzeugen neueren Baujahrs und aus gut erhaltenen Altfahrzeugen demontiert. Fahrzeuge in schlecht erhaltenem Zustand werden oftmals keiner weiteren Behandlung unterzogen. Eine materialorientierte Demontage von Bauteilen zur Wieder-/Weiterverwertung wird heute nur dann durchgeführt, wenn das Bauteil aufgrund des hohen Materialwertes gewinnbringend verkauft werden kann (z.B. Katalysatoren).

¹⁰ Die Trockenlegung umfasst die Entnahme von Betriebsflüssigkeiten wie z.B. Kraftstoff, Motor- und Getriebeöl, Kühl- und Scheibenreinigungsflüssigkeiten und die Demontage von flüssigkeitstragenden Bauteilen wie z.B. Ölfilter oder Batterie.

Die so vorbehandelten Fahrzeuge werden zur Reduzierung des Transportvolumens flachgedrückt und zu den Shredderbetrieben transportiert. Mittels entsprechenden Zerkleinerungs- und Sortierprozessen werden dort die Karossen in eine Stahl-, Shredderschwer- und Shredderleichtfraktion getrennt. Der Stahlschrott stellt mit ca. 60% des Inputs die größte Fraktion dar und findet in der Stahl- und Eisenindustrie erneut als Rohstoff seinen Einsatz. Die Nichteisen-Metalle der Shredderschwerfraktion werden mit Hilfe physikalischer Trennung von dem Rest (z.B. Glas, Steine, etc.) separiert und an die NE-Metall Industrie verkauft. Die Shredderleichtfraktion stellt ca. 25% des Shredderinputs dar und fällt in einer Menge von ca. 500.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland an /PAS 00/. Sie besteht hauptsächlich aus Kunststoffen, Gummi und Glas und weist Restmengen von Stahl und NE-Metallen auf. Bislang wurden die Shredderrückstände fast ausschließlich auf Hausmülldeponien verbracht /SOL 03/.

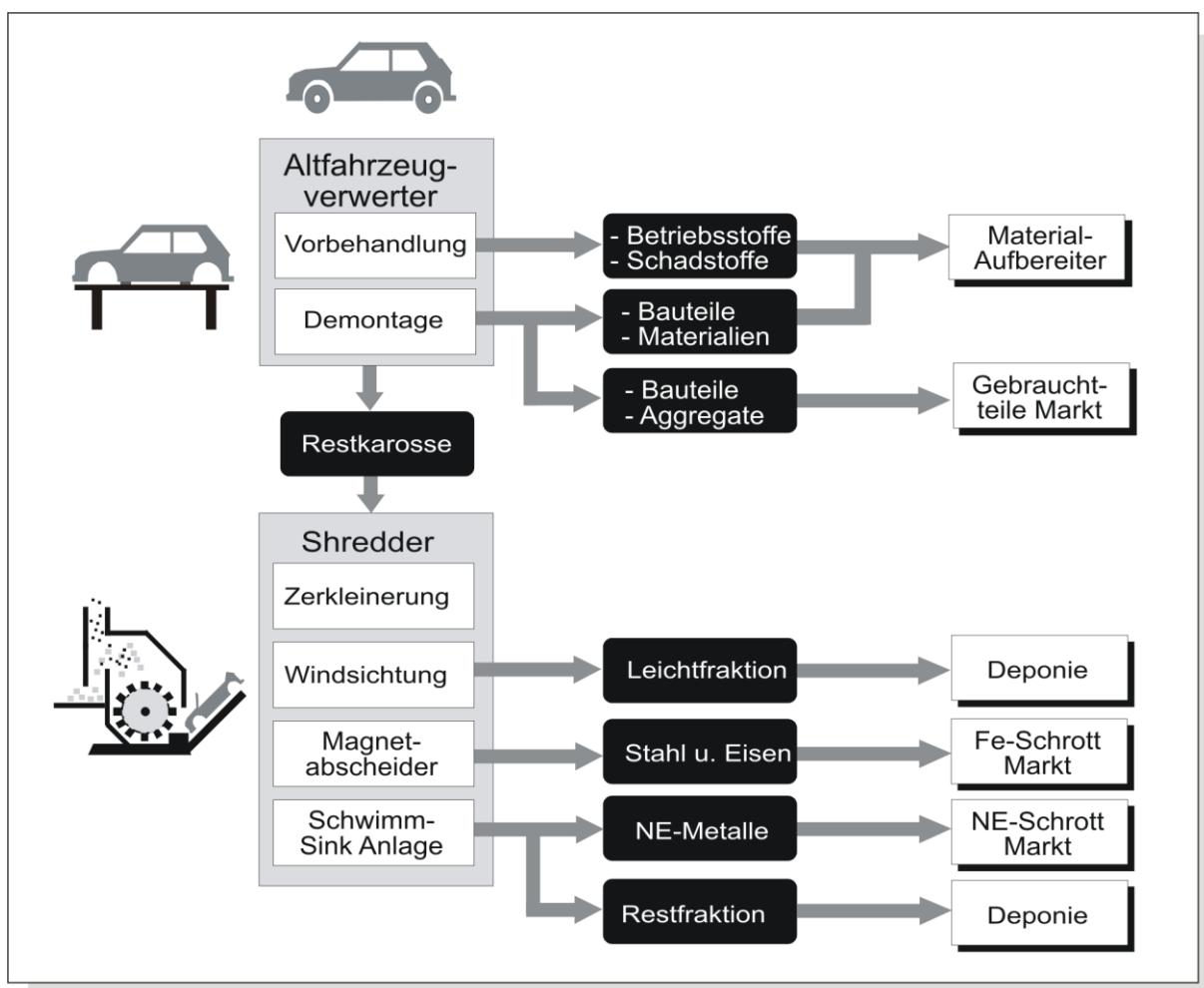


Abbildung 3.1: Ablauf Altfahrzeugrecycling

3.1.2 Problembereiche des Altfahrzeugrecyclings

Durch die beschriebene Entsorgungskette -Altfahrzeugverwerter, Shredderbetrieb, Deponierung der Shredderrückstände- wird bei den heute zur Verwertung anstehenden Fahrzeugen eine Recyclingquote von ca. 75 Gew.% erreicht. Unter Beibehaltung des bisherigen Prozessablaufes werden sich jedoch folgende Problembereiche ergeben:

- ☐ Mengenprobleme der Shredderleichtmüllfraktion,
- ☐ Probleme bei der Deponierung des Shredderleichtmülls und
- ☐ Unsachgemäße Vorbehandlung der Altfahrzeuge.

Zeitversetzt zu dem Anstieg der Neuzulassungen und des Bestandes haben die Fahrzeuglöschungen, als Ausgangspunkt des Fahrzeugrecyclings, stetig zugenommen. Wurden im Jahr 1980 im zentralen Fahrzeugregister des Kraftfahrt-Bundesamtes ca. 2 Mio. PKW gelöscht¹¹, so waren es im Jahr 2002 bereits über 3 Mio. PKW /KBA 02/. Für das Jahr 2020 werden Löschungszahlen von mehr als 4 Mio. PKW prognostiziert /SHE 02/. Gleichzeitig hat sich die Materialzusammensetzung der Fahrzeuge aufgrund der technischen Entwicklung im Automobilbau kontinuierlich geändert. Besonders Leichtmetalle und Kunststoffe legten bei den eingesetzten Materialien im Fahrzeug am stärksten zu /NAT 98/. Die Konsequenz ist, dass sich bei gleich bleibenden Prozessketten das Aufkommen an Shredderrückständen in den nächsten Jahren zunehmend erhöhen wird.

Hinzu kommt eine Verschärfung der Standards bei der Deponierung der Shredderleichtfraktion. Die Abfallablagerungsverordnung /BMU 01/ in Kombination mit der Technischen Anleitung Siedlungsabfall /TAS 93/ legt bei der Deponierung in Abhängigkeit der Deponieklassen Regelungen für extrahierbare lipophile Stoffe und den Glühverlust vor. Demnach darf der Glühverlust des Trockenrückstandes der Originalsubstanz maximal 5% betragen. Dies galt bereits ab dem Jahre 1993, jedoch konnten die zuständigen Behörden bei noch fehlenden Behandlungskapazitäten für einen Übergangszeitraum von 12 Jahren eine Weiterführung der Ablagerung von

¹¹ Die Anzahl der gelöschten Fahrzeuge stellt nicht zwangsläufig den zur Verwertung im Inland anstehenden Mengenstrom dar. Bei der Bewertung der Zahlen ist vielmehr darauf zu achten, dass es für eine Löschung im Zentralregister des Kraftfahrtbundesamtes mehrere Gründe geben kann (u.a. Export des PKW). Nach Schätzungen der Arbeitsgemeinschaft Altauto (ARGE) verbleiben lediglich ca. 50% der gelöschten Fahrzeuge zur Verwertung im Inland /ARG 00/.

unbehandelten Abfällen zulassen /BAA 04/. Am 1. Juni 2005 liefen diese Ausnahmeregelungen aus, sodass eine Deponierung von unbehandelter Shredderleichtfraktion auf Hausmülldeponien in Deutschland nicht mehr möglich ist. Ist kein geeignetes Verwertungsverfahren vorhanden, so wird die Sonderabfallverbrennung als Entsorgungshinweis der Präferenzklasse Eins genannt. Die Entsorgungskosten würden somit erheblich ansteigen und die Wirtschaftlichkeit der Altfahrzeugverwertung in Frage stellen. Die Folge wäre ein noch höherer Export von Shredderrückständen und/oder kompletten Restkarossen ins Ausland, was aus umweltrechtlicher Sicht bedenklich ist und dem Grundsatz einer anzustrebenden Entsorgungsautarkie widerspricht.

Neben den Mengen- und Entsorgungsproblemen der Shredderrückstände entstehen zunehmend Umweltprobleme aufgrund der unsachgemäßen Vorbehandlung der Altfahrzeuge durch die Verwertungsbetriebe. Als Problempunkte sind vor allem die unsachgemäße Lagerung, Behandlung und Entsorgung der Betriebsflüssigkeiten sowie die unzureichende Platzausgestaltung der Verwertungsbetriebe (Befestigung der Lagerflächen, etc.) zu nennen.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen des Altfahrzeugrecyclings

Aufgrund der beschriebenen Entsorgungs- und Verwertungsproblematik haben sich insbesondere in den letzten Jahren zahlreiche Aktivitäten und Gesetzesvorhaben zur Umsetzung einer umweltgerechten Altfahrzeugverwertung entwickelt. Angestoßen durch die im Rahmen der EU-Umweltaktivitäten durchgeführten Untersuchungen der Hauptabfallströme wurden von den verschiedenen Staaten unter Beteiligung der jeweiligen Wirtschaftskreise Konzepte zur Neuordnung der Altfahrzeugverwertung erarbeitet. Gemeinsames Ziel dieser Konzepte ist die flächendeckende Sammlung und Verwertung der Altfahrzeuge, sowie die Reduzierung der Menge und Schädlichkeit der entstehenden Abfälle.

In den folgenden Kapiteln werden die Inhalte der europäischen Altfahrzeugrichtlinie und deren Umsetzung in nationales Recht am Beispiel Deutschland, sowie das japanische Altfahrzeuggesetz als Schwerpunkte der weltweiten Gesetzesaktivitäten zum Altfahrzeugrecycling aufgezeigt und diskutiert.

3.2.1 Altfahrzeug-Richtlinie der Europäischen Union

Im September 2000 wurde vom Europäischen Parlament die Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG verabschiedet /EG 00/. Hersteller und Importeure sind damit zukünftig zur kostenlosen Rücknahme der Altfahrzeuge verpflichtet und müssen ein flächendeckendes Rücknahmesystem aufbauen. Des Weiteren werden verbindliche Recyclingquoten für die Jahre 2006 und 2015 vorgegeben und der Anteil der energetischen Verwertung begrenzt. Abbildung 3.2 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Vorgaben der Altfahrzeug-Richtlinie, die bei der Umsetzung ins deutsche Recht im Altfahrzeug-Gesetz übernommen wurden.

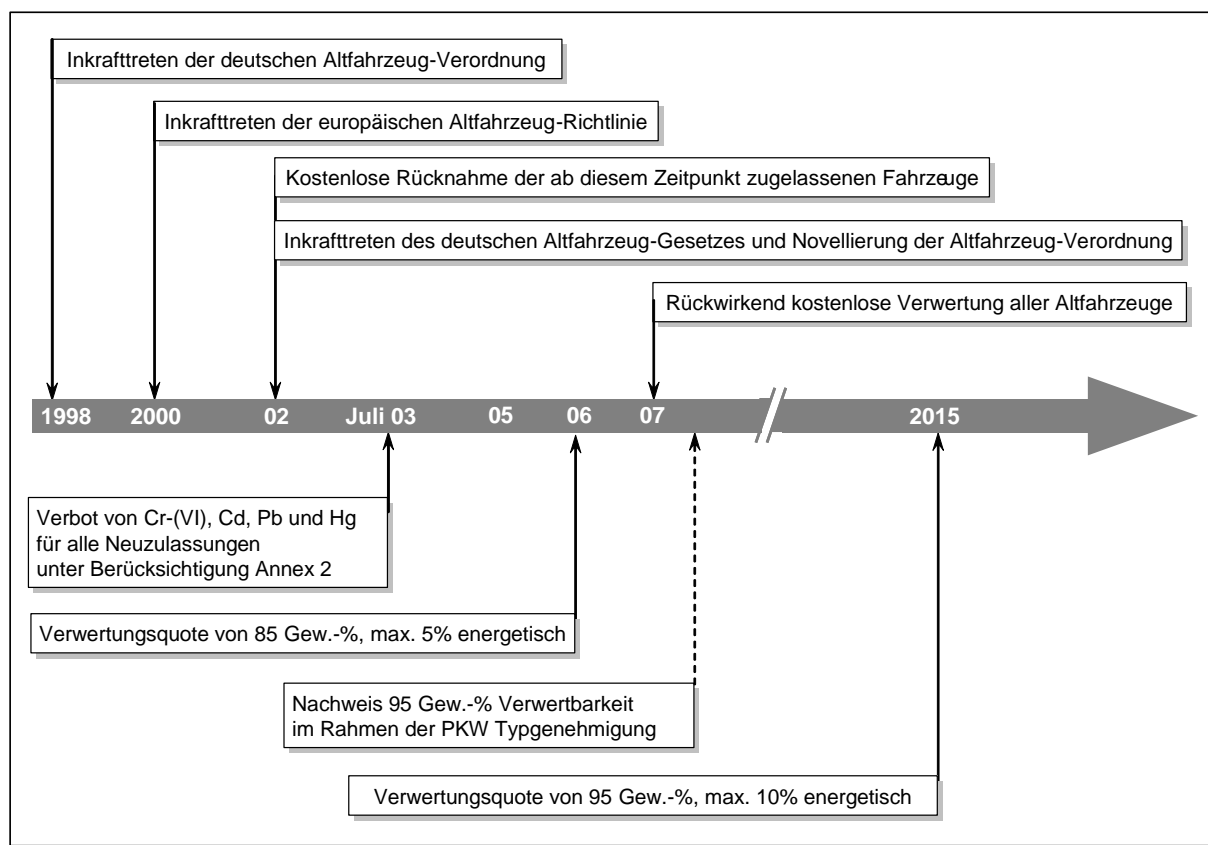


Abbildung 3.2: Inhalte der europäischen Altfahrzeugrichtlinie

3.2.2 Altfahrzeug Gesetz Deutschland

Das Altfahrzeug-Gesetz /BMU 02/ entspricht der Umsetzung der EU-Altfahrzeug-Richtlinie in deutsches Recht. Das Altfahrzeug-Gesetz bildet die Rahmenbedingungen zur Anwendung der Altfahrzeug-Verordnung /BMU 02-1/ und gab gleichzeitig die Änderungen der Verordnung zu deren im Juni 2002 durchgeführten

Novellierung vor. Die novellierte Altfahrzeug-Verordnung löste die bestehende deutsche Altauto-Verordnung und die Freiwillige Selbstverpflichtung der deutschen Automobilindustrie ab /BMU 97, BMU 97-1/. Sie stellt konkrete technische Mindestanforderungen an die Behandlung, Lagerung und Verwertung von Altfahrzeugen und soll die illegale Entsorgung verhindern. Ziel der Verordnung ist einen geregelten Produktkreislauf für die vom Altfahrzeug stammenden Abfallströme zu bilden und aufrecht zu erhalten.

Gleichzeitig soll das aus Altfahrzeugen stammende Abfallvolumen durch eine Förderung der Wiederverwendung und Wiederverwertung reduziert werden und durch den erneuten Einsatz der Materialien der Verbrauch an Primärrohstoffen für die Neuproduktion gesenkt werden. Durch das Verbot umweltgefährdender Stoffe soll zusätzlich die Schädlichkeit der zu entsorgenden Altfahrzeuge, bzw. der entstehenden Abfallfraktionen, verringert werden.

Zum Erreichen der genannten Ziele sind in der Altfahrzeug-Verordnung mehrere Beschränkungen und Verbote verankert worden. So müssen alle Neuwagen, die ab dem 1. Juli 2002 zugelassen wurden und in Zukunft eine Zulassung erhalten werden, vom Hersteller oder Importeur unentgeltlich zurückgenommen und ordnungsgemäß entsorgt werden. Mit Beginn des Jahres 2007 wird diese Verpflichtung rückwirkend für alle Fahrzeuge gelten, unabhängig von deren Alter.

Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, müssen ab Januar 2006 mindestens 80 Gewichtsprozent vom Fahrzeugleergewicht stofflich verwertet und weitere 5 Gew.-% einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Mit Beginn des Jahres 2015 wird sich die stoffliche Verwertungsquote auf 85 Gew.-% und die energetische auf 10 Gew.-% erhöhen. Aber auch speziell für die nichtmetallischen Shredder-rückstände besteht nach Altfahrzeug-Verordnung eine Mindestverwertungsquote. Nach Abschnitt 4.1.2 des Anhangs müssen von dieser Fraktion zum 1. Januar 2006 mindestens 5 Gew.-% des Fahrzeugleergewichtes einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt werden. Ab 2015 sind entsprechend mindestens 5 Gew.-% einer stofflichen Verwertung und weitere 10 Gew.-% einer stofflichen oder energetischen Verwertung zuzuführen.

Zusätzlich zu den Verwertungsquoten enthält die Verordnung Stoffverbote für die Herstellung von Fahrzeugen und deren Bauteile. Von den im Anhang II der

Altfahrzeug-Richtlinie der Europäischen Union angegebenen Ausnahmen abgesehen, muss ab dem 1. Juli 2003 auf die Verwendung der Schwermetalle Cadmium, Quecksilber, Blei und sechswertiges Chrom verzichtet werden.

Für die Fahrzeugdemontage sind die Hersteller dazu verpflichtet, notwendige Informationen für jedes Fahrzeug bereitzustellen. Unter Abschnitt 3.2.3 des Anhangs der Verordnung wird der Mindestdemontageumfang festgelegt, wobei zusätzlich die Bauteile, die unter die Ausnahmeregelung des Anhang II der EU-Altfahrzeug-Richtlinie fallen und dementsprechend gekennzeichnet sein müssen, in jedem Fall bei der Altfahrzeugverwertung demontiert werden müssen. Ab dem 1. Januar 2006 sind aus Altfahrzeugen durchschnittlich mindestens 10 Gew.-% Bauteile, Materialien und Betriebsflüssigkeiten auszubauen bzw. zu entfernen und einer Wiederverwendung oder stofflichen Verwertung zuzuführen, wenn nicht nachgewiesen werden kann, dass die stoffliche Verwertungsquote auf andere Weise erfüllt wird.

3.2.3 Typgenehmigung Recyclingfähigkeit

Neben den Verpflichtungen zu Umsetzung einer umweltverträglichen Behandlung des Fahrzeuges an seinem Lebensende müssen die Hersteller gemäß Artikel 7 Absatz 4 der Europäischen Altfahrzeugrichtlinie bereits bei der Konstruktion des Fahrzeuges darauf hinwirken, dass die festgelegten Recyclingziele auch umgesetzt werden können. Hierzu ist zukünftig im Rahmen der Fahrzeug Typgenehmigung der Nachweis der Recyclingfähigkeit zu erbringen. Im aktuellen Entwurf der Richtlinie über die Typgenehmigung hinsichtlich Recyclingfähigkeit /EG 05/ werden folgende Anforderungen festgelegt:

- ☐ Fahrzeuge, welche 3 Jahre nach Verabschiedung der Richtlinie in Verkehr gebracht werden, sind so zu konstruieren, dass die für das Jahr 2015 geforderten Recyclingquoten eingehalten werden können. Hierzu ist zum Zwecke der Typgenehmigung ein Recyclingkonzept vorzulegen, in dem die Materialströme des Fahrzeuges entlang des Verwertungsprozesses beschrieben werden.
- ☐ Das Recyclingkonzept ist für jede Aufbauart (Rohbauvariante) eines Fahrzeugtyps zu erstellen und zwar jeweils für ein repräsentatives Fahrzeug. Dieses Fahrzeug soll unter den Gesichtspunkten der Recyclingfähigkeit die schwierigste Variante darstellen.

- ☐ Im Rahmen einer Vorprüfung muss der Hersteller nachweisen, dass er in der Lage ist, die notwendigen Materialdaten des Fahrzeuges ordnungsgemäß zu erfassen, sowie die Kennzeichnung der Bauteile entsprechend zu prüfen.

Zur Verifizierung des Recyclingkonzeptes ist eine Recyclingstrategie vorzulegen. Diese sollte auf Recyclingtechniken beruhen, die bei der Typgenehmigung entweder bereits zur Verfügung stehen oder aber in Entwicklung sind.

3.2.4 Altfahrzeug Gesetz Japan

Nach Verabschiedung der gesetzlichen Regelungen zum Altfahrzeugrecycling innerhalb der Europäischen Union im Jahre 2000 gibt es nun auch in anderen Ländern entsprechende Initiativen. In Japan trat zum 01.01.2005 ein Altfahrzeug-Gesetz in Kraft /JAM 04/. Die Fahrzeughersteller werden darin verpflichtet für den Aufbau von Recyclingtechnologien zu sorgen und die ordnungsgemäße Behandlung der Stoffströme sicherzustellen. Die wesentlichen Unterschiede zur Altfahrzeug-Richtlinie der Europäischen Union sind:

- ☐ Fokussierung auf die Problembereiche: Verwertung von Kältemittel aus Klimaanlage, Verwertung von pyrotechnischen Komponenten sowie Verwertung der Shredderleichtfraktion.
- ☐ Bereitstellung von detaillierten fahrzeugspezifischen Informationen.
- ☐ Erweiterung des Geltungsbereiches auf Nutzfahrzeuge und Busse.

Die Finanzierung der Verwertungskosten erfolgt über ein Fond-System. Der Kunde muss beim Erwerb eines Neuwagens eine fahrzeugspezifische Recyclinggebühr entrichten. Für die im Bestand befindlichen Fahrzeuge wird diese Gebühr im Rahmen der nächsten Haupt-Untersuchung erhoben. Bei Verwertungseintritt des Fahrzeuges werden die anfallenden Kosten aus diesem Fond finanziert. Zur Berechnung der fahrzeugspezifischen Recyclinggebühr müssen sowohl für alle Neuwagen als auch für alle im Bestand befindlichen Fahrzeuge folgende Informationen bereitgestellt werden:

- ☐ Ausrüstung des Fahrzeuges mit Klimaanlage
- ☐ Anzahl der Airbags und deren Position im Fahrzeug
- ☐ Anfallende Menge an Shredderleichtmüll je Fahrzeug

Weiterhin müssen den japanischen Verwertungsbetrieben detaillierte Demontageanleitungen und Hilfsmittel zur Behandlung der pyrotechnischen Einheiten zur Verfügung gestellt werden.

3.3 Zusammenfassung

Der Ablauf der Altfahrzeugverwertung ist mit zahlreichen Problemen verbunden, die die bisherige Entsorgungspraxis in Frage stellen. Neben der unsachgemäßen Vorbehandlung der Fahrzeuge sind insbesondere die Zunahme der Menge und Schädlichkeit der entstehenden Shredderrückstände sowie die Gefährdung der Wirtschaftlichkeit der Verwertung angesichts der steigenden Behandlungskosten für die Shredderrückstände als Problembereiche zu nennen.

Zur Lösung der Problematik wurden von den Gesetzesgebern und den beteiligten Wirtschaftskreisen verschiedene Konzepte zur Neuordnung der Altfahrzeugverwertung erarbeitet. Gemeinsames Ziel dieser Konzepte ist die flächendeckende Sammlung und Verwertung der Altfahrzeuge sowie die Reduzierung der Menge und Schädlichkeit der entstehenden Abfälle. Zur Zielerreichung wird in Zukunft neben der Trockenlegung und einer verstärkt ersatzteil- und materialorientierten Demontage der Fahrzeuge insbesondere die Aufbereitung und Verwertung der Shredderrückstände eine zunehmende Bedeutung haben. An dem traditionellen Weg der Autoverwertung sollen dabei keine wesentlichen Veränderungen vorgenommen werden, das Ziel ist vielmehr die Stärkung der dahinter stehenden Strukturen.

Mit der Festlegung von einheitlichen Anforderungen an Altfahrzeugverwerter und Shredderbetreiber wird sichergestellt, dass die Altfahrzeuge zukünftig nur in umweltgerecht arbeitende Betriebe gelenkt werden. Weiterhin wird durch die Verpflichtung zur Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung eine einheitliche Vorbehandlung der Fahrzeuge gewährleistet, wodurch das Schadstoffpotential der Shredderrückstände erheblich reduziert wird. Durch eine regelmäßige Zertifizierung der Betriebe wird sichergestellt, dass diese Anforderungen auch eingehalten werden. Da diese Anforderungen im Rahmen der Altfahrzeugrichtlinie europaweit standardisiert werden, kann der aus umweltrechtlicher Sicht bedenkliche Export der Restkarossen und/oder des Shredderleichtmülls eingedämmt und somit der Grundsatz der Entsorgungsautarkie umgesetzt werden.

Unter Wahrung Ihrer Produktverantwortung müssen die Fahrzeughersteller die Recyclingfähigkeit von zukünftigen Fahrzeuggenerationen bereits bei deren Konstruktion berücksichtigen. Hierzu ist zukünftig für alle neuen Fahrzeug-Baureihen die Erstellung eines Demontage- und Recyclingkonzeptes zur Erlangung der Typgenehmigung erforderlich. Diese Informationen sind in entsprechender Form auch den Altfahrzeugverwertungs-Betrieben zur Verfügung zu stellen. Im Rahmen einer Vorprüfung muss der Hersteller darüber hinaus nachweisen, dass er in der Lage ist, die notwendigen Materialdaten des Fahrzeuges ordnungsgemäß zu erfassen, sowie die Kennzeichnung der Bauteile entsprechend zu prüfen.

Um den Aufbau von Stoffkreisläufen zu forcieren sind bei der Produktion von PKW verstärkt Sekundärmaterialien einzusetzen. Demgegenüber sind bestimmte Werkstoffe, welche bei der späteren Altfahrzeugverwertung eine Gefährdung für die Umwelt darstellen können, bereits bei der Konstruktion zu vermeiden. Durch die gezielte Entwicklung von recyclinggerechten Fahrzeugen soll somit langfristig eine Verbesserung der Recyclingsituation erreicht werden.

4 Produktentwicklung und Recycling

Ein wesentlicher Punkt um die Verbesserung der Recyclingsituation von Fahrzeugen langfristig sicherzustellen ist die möglichst frühzeitige Berücksichtigung der Recyclerfordernisse im Rahmen der PKW-Entwicklung. Die hierzu vorhandenen Ansätze und Methoden werden in diesem Kapitel vorgestellt. Kapitel 4.1 zeigt zunächst den aktuellen Stand der Konstruktionsmethoden innerhalb der Fahrzeugentwicklung. Darauf aufbauend werden in Kapitel 4.2 die vorhandenen Ansätze zur recyclinggerechten Konstruktion analysiert und bewertet. Kapitel 4.3 fasst den Stand der Technik zusammen und zeigt die wesentlichen Defizite auf.

4.1 Fahrzeug-Entwicklungsprojekte

Die Forderung nach einer konsequenten Ausrichtung auf Markt- und Kundenbedürfnisse in Bezug auf Produktqualität und Verfügbarkeit haben die Entwicklungsabläufe der Automobilindustrie zunehmend verändert. Die einzelnen Unternehmen sind gefordert, in immer kürzerer Zeit zu drastisch verringerten Kosten qualitativ hochwertige Produkte auf den Markt zu bringen (siehe Abbildung 4.1).



 <p>wenig Konkurrenz im Premiumsektor</p>		 <p>harter Wettbewerb</p>
wenige Modellvarianten und Sonderausstattungen	Marktentwicklung	viele Modellvarianten und Sonderausstattungen
niedriger Innovationsgrad	Komplexität	hoher Innovationsgrad
7 Jahre oder mehr	Technologie	hoher Innovationsgrad
wenig Beteiligte, überschaubar	Entwicklungszeit	4 Jahre und weniger
geringer Anspannungsgrad	Arbeitsweise	viele Beteiligte, hochvernetzt
Lange Entwicklungszeit sorgt für hohe Produktreife und -qualität	Kosten	hoher Anspannungsgrad
	Produktqualität	Null-Fehler-Ziel, Kundenzufriedenheit sind strategische Unternehmensziele

Abbildung 4.1: Herausforderungen im Automobilbau nach /GOR 02/

Zur Lösung der Probleme im o.g. Spannungsfeld wurden in den letzten Jahren neue Konzepte entwickelt, die im Sinne einer integrierten Vorgehensweise die Verbesserung der Ablauf- und Aufbauorganisation im Hinblick auf Entwicklungszeiten, Produktkosten und Produktqualität anstreben /EHR 03, PAH 05, EVE 05/.

Zentraler Ansatzpunkt ist die zeitliche Parallelisierung der Entwicklung eines Produktes und seiner Produktionsmittel, um somit eine optimale Abstimmung zu gewährleisten und die gesamte Produkterstellungszeit deutlich zu verkürzen (siehe Abbildung 4.2). Dadurch ist es möglich, die Produkteigenschaften früher als bei der konventionellen sequentiellen Vorgehensweise zu verifizieren und damit notwendige Änderungen vorzeitig einzuleiten.

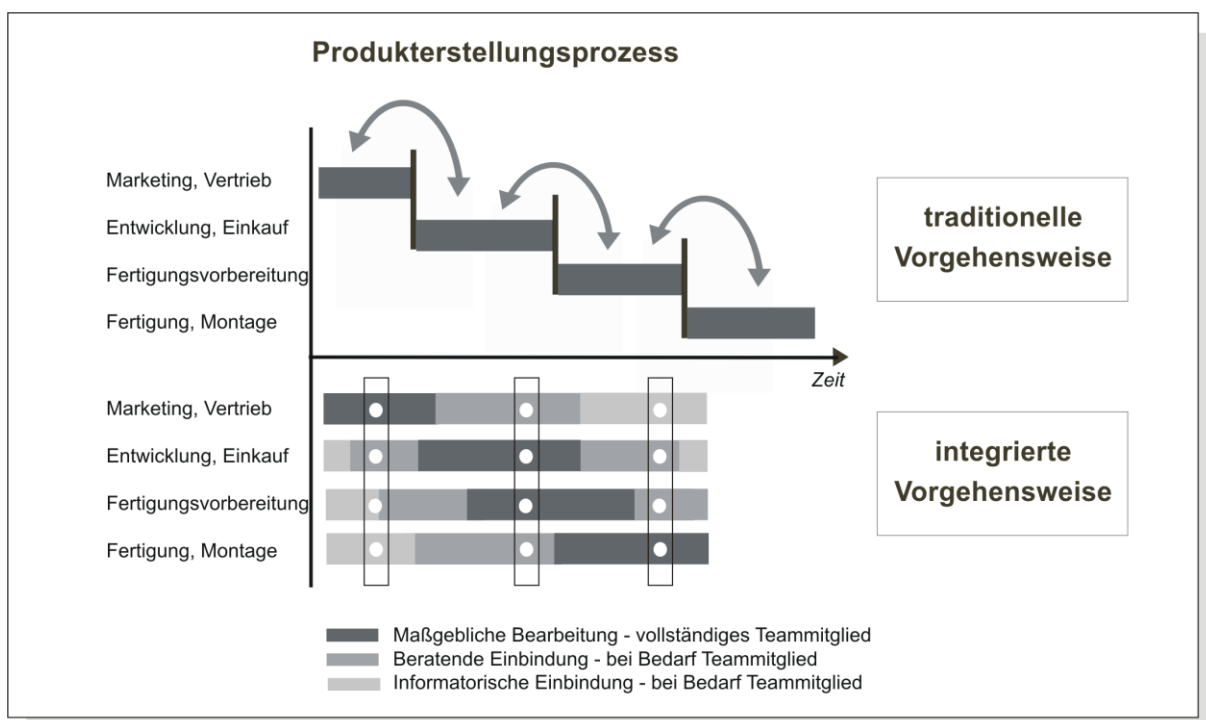


Abbildung 4.2: Konzept der Integrierten Produktentwicklung /EHR 03/.

Zur Umsetzung dieser Konzepte haben die einzelnen Automobilhersteller ihre Entwicklungsabläufe von der grundsätzlichen Überlegung bis zu einem neuen Fahrzeug im Sinne einer integrierten Vorgehensweise neu ausgerichtet. Wesentlicher Punkt ist die Einbeziehung und Vernetzung aller Beteiligten in Vertrieb, Entwicklung, Produktion und Zulieferer entlang des gesamten Entwicklungsprozesses /SCH 00/.

Die einzelnen Bausteine bei der Umsetzung dieser Konzepte sind:

- ❑ eine methodische Vorgehensweise, die eine Betrachtung des gesamten Produktentstehungsprozesses beinhaltet, bei der nicht nur das Produkt, sondern auch die Produktionsprozesse im Vordergrund stehen.
- ❑ eine Organisationsform, die eine teilweise Parallelisierung unterschiedlicher Arbeitsprozesse ermöglicht und partnerschaftliches interdisziplinäres Arbeiten innerhalb des Unternehmens sowie mit Kunden und Zulieferanten fördert.
- ❑ der Einsatz geeigneter informationstechnischer Hilfsmittel.

4.1.1 Prozess der Fahrzeugentwicklung

Das Prozessmodell stellt das Rückgrat des Produktentstehungsprozesses dar. Es beschreibt, in welchen wesentlichen Schritten ein Fahrzeug von den ersten Überlegungen bis zur Serienfertigung entsteht¹² (siehe Abbildung 4.3).

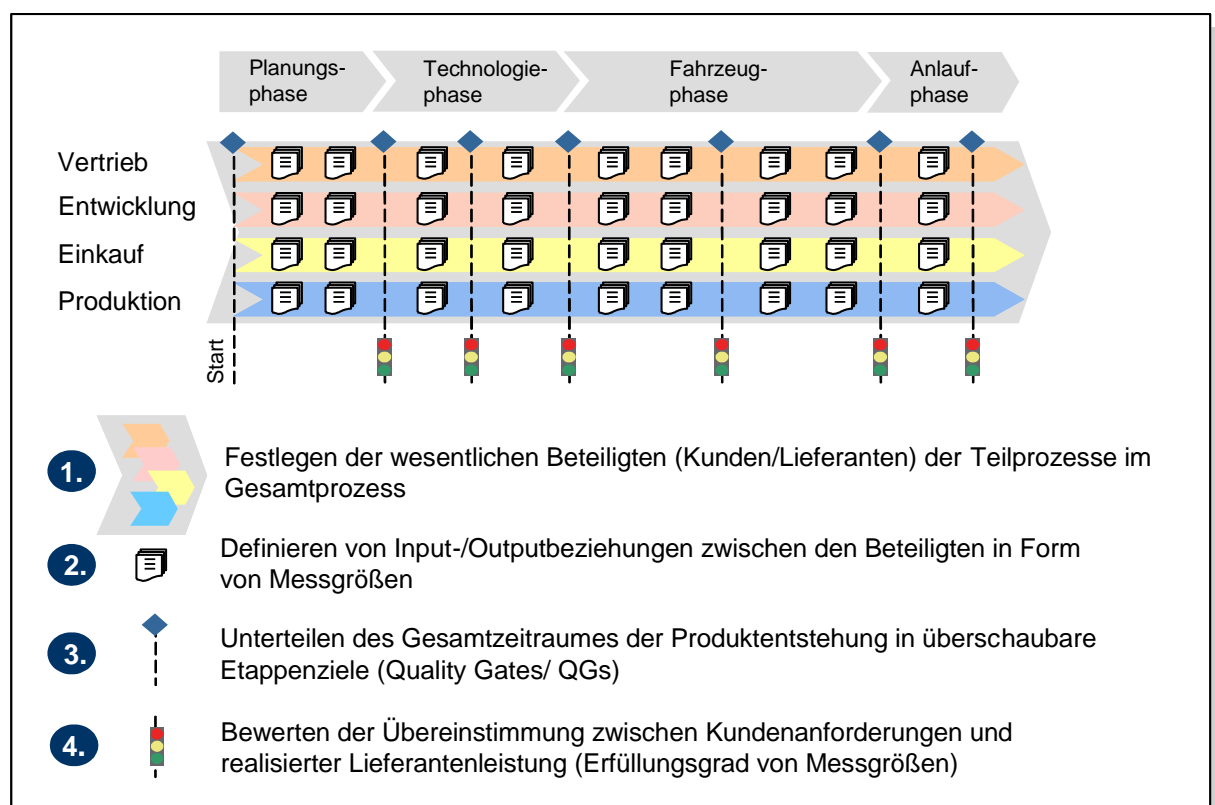


Abbildung 4.3: Ablauf von Fahrzeugentwicklungsprojekten nach VDI 2221, GOR 02/

¹² vgl. hierzu die VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte VDI 93-1/.

Der Prozessablauf orientiert sich hierbei an gemeinsam übergreifenden Prinzipien. Hierzu gehören:

- ❑ Die durchgängige Strukturierung und Unterteilung des Prozesses mit verbindlichen Vereinbarungen und Bewertung von Teilzielen sowie Festlegung der Konsequenzen bei Nichterreichung dieser Ziele durch „Quality- Gates“¹³.
- ❑ Die frühzeitige und bereichsübergreifende Zusammenführung aller am Prozess Beteiligten mit Integration der jeweiligen Lieferanten.
- ❑ Die konsequente Serienorientierung bereits in der Frühphase des Entwicklungsprozesses.

Erster Schritt des Prozessmodelles ist die Planungsphase. Dieser Prozessabschnitt schafft die Grundlagen für die Konkretisierung eines Fahrzeuges, indem aus Markt- und Unternehmenssicht die grundsätzlichen Anforderungen und Handlungsbedarfe aufgezeigt und formuliert werden. Das Vorgehen bei der Planungsphase lässt sich prinzipiell in folgende Abschnitte gliedern:

- ❑ Die Umfeldanalyse beinhaltet die Analyse der unternehmensexternen Einflussgrößen. Hierzu zählen insbesondere politische (Gesetze), ökonomische (Kunden, Markt), soziale (Gesellschaft) und technische Randbedingungen, die von außen auf das Unternehmen einwirken. Bei der Analyse werden insbesondere zukünftige Entwicklungstendenzen berücksichtigt.
- ❑ Die Unternehmensanalyse beinhaltet die Analyse der unternehmensinternen Zielsetzungen und Anforderungen. Diese sind in den jeweiligen Unternehmensstrategien oder Leitlinien festgeschrieben und zeigen im Wesentlichen auf, was das Unternehmen langfristig erreichen möchte.
- ❑ Die Produktanalyse umfasst das Erkennen und Klären der Stellung der derzeitigen Eigen- und Wettbewerbsprodukte auf den einzelnen Märkten hinsichtlich Umsatz, Marktanteil, Lebenszyklus-Phase etc. (Produkt-Markt-Matrix). Des Weiteren wird die technische Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge, der einzelnen Komponenten (z.B. Motor, Ausstattung, etc.) und der Produktionsprozesse im Vergleich zu den Wettbewerbern dargestellt.

¹³ Ein in einem Prozess vereinbarter Zeitpunkt, zu welchem die zuvor vereinbarten Leistungen durch die benannten Lieferanten und Kunden gemeinsam gemessen und hinsichtlich ihrer Qualität und Vollständigkeit bewertet werden.

Aus der Analyse des Unternehmens, seiner Produkte sowie den relevanten Einflussgrößen aus dem Umfeld lassen sich die Stärken und Schwächen des Unternehmens und seiner Produkte sowie die Chancen und Risiken bezüglich der zukünftigen Entwicklungstendenzen bestimmen. Diese Untersuchungen stellen die Grundlage für das Bestimmen von konkreten Zielsetzungen für die Entwicklung des neuen Produktes dar. Es gilt nun, strategische Freiräume innerhalb des Sortiments oder des Marktes zu finden. Hierbei spielt insbesondere das Erkennen von Kundenbedürfnissen und Markttrends eine wichtige Rolle. Für die favorisierten Suchfelder werden dann erste Produktideen generiert, bezüglich ihrer prinzipiellen Tauglichkeit untersucht und entsprechend ausgewählt.

Das Ergebnis der Planungsphase ist der Fahrzeugsteckbrief. In ihm werden die zentralen Anforderungen und Handlungsbedarfe sowohl für das Gesamtfahrzeug als auch für die einzelnen Komponenten hinsichtlich Funktionalität, Produzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit formuliert. Er stellt die Grundlage für die weiteren Phasen des Entwicklungsablaufes dar.

In der Technologiephase werden für die einzelnen Innovationen prinzipielle Lösungsmöglichkeiten erarbeitet, zur Serientauglichkeit entwickelt und zu einem Gesamtfahrzeugkonzept integriert. Bereits in dieser frühen Phase wird vielfach eine enge Zusammenarbeit mit der Zulieferindustrie realisiert.

Hierbei wird zunächst festgelegt, wie und mit welchen Mitteln das Produkt prinzipiell oder qualitativ funktionieren könnte. Der Konstrukteur muss hierbei durch die Suche in Lösungssammlungen oder Katalogen oder durch Analogiebildung und Assoziationen prinzipielle Lösungen finden. Die einzelnen Alternativen werden anschließend hinsichtlich den geforderten Produkt- und Prozesseigenschaften untersucht und entsprechend selektiert. Das Ergebnis ist das Produktkonzept, eine aus mehreren Lösungsmöglichkeiten ausgewählte prinzipielle Lösung, die alle gestellten Anforderung optimal erfüllt. (Quality Gate: Konzepttauglich).

Im nächsten Schritt wird das qualitativ funktionierende Produkt aus der Form eines Konzeptes in ein quantitativ funktionierendes und fertigbares technisches Gebilde überführt. Dabei werden noch nicht sämtliche Details fertig gestaltet, sondern nur die wesentlichen Bauteile und Baugruppen. Mit Abschluss der Technologiephase sind somit alle wesentlichen geometrischen, stofflichen und fertigungstechnischen

Merkmale des Gesamtfahrzeuges und der darin enthaltenen Komponenten festgelegt (Quality Gate: Serientauglich).

Je nachdem ob ein neues Fahrzeug auf komplett neuen Technologien und Komponenten beruht, oder bereits serientaugliche entwickelte Technologien nutzt, erhöht oder verringert sich der Entwicklungsaufwand in der Technologiephase. So werden oftmals im Rahmen der Entwicklung eines Neu-Fahrzeuges verschiedene Konstruktionslösungen aus einem bestehenden Konzept übernommen und lediglich angepasst. Besonders deutlich wird dies bei der gemeinsamen Nutzung bereits bestehender Plattformen.

Die endgültige Gestaltung und maßliche Festlegung aller Details des verabschiedeten Produkt- und Produktionskonzeptes wird in der Fahrzeugphase vorgenommen. Der konstruktionsseitige Schwerpunkt umfasst hierbei die Festlegung der fahrzeugspezifischen Umfänge und Optimierung der Eigenschaften und Funktionalitäten des Gesamtfahrzeuges. Der Abschluss der Konstruktion ist die Erteilung der Produktionsfreigabe. Im Anschluss an die Produktionsfreigabe erfolgt im Rahmen der Anlaufphase die Feinplanung und Bestätigung der Produktionsprozesse und der erforderlichen Prüfabläufe, so dass zum Serienbeginn ein prozesssicheres Produkt zur Verfügung steht.

Die genannten Konstruktionsphasen sind durch das Prinzip Entflechtung –mit den Quality Gates als wichtigstes Gestaltungselement– grundsätzlich gekennzeichnet. Dieses Prinzip besagt, dass eine neue Etappe im Prozess erst dann in Angriff genommen wird, wenn der vorhergehende Abschnitt durch die Erfüllung der entsprechenden Quality Gates erfolgreich abgeschlossen wurde. Das heißt, dass jeweils nur auf einer abgesicherten Basis weitergearbeitet wird. So ist beispielsweise die unbedingte Serientauglichkeit von Technologien und Komponenten als Voraussetzung für den Beginn der Fahrzeugphase ebenso notwendig wie das fertig entwickelte Gesamtfahrzeug am Ende der Fahrzeugphase, um in der Anlaufphase den Produktionsprozess entsprechend einfahren zu können.

Die Definition und Ausgestaltung der Quality Gates sind hierbei konsequent am Prozess orientiert. Sie führen bereichs- bzw. ressortübergreifend alle am Prozess Beteiligten zusammen –Lieferanten eingeschlossen- und integrieren damit regelmäßig die einzelnen Teilumfänge des Prozesses zu einem Gesamtstatus. Die

Teilabschnitte werden dadurch in ihrer Gesamtheit transparent und steuerbar, der Projektgleichschritt wird sichergestellt. Die Vorgehensweise des Quality Gate Prinzips ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

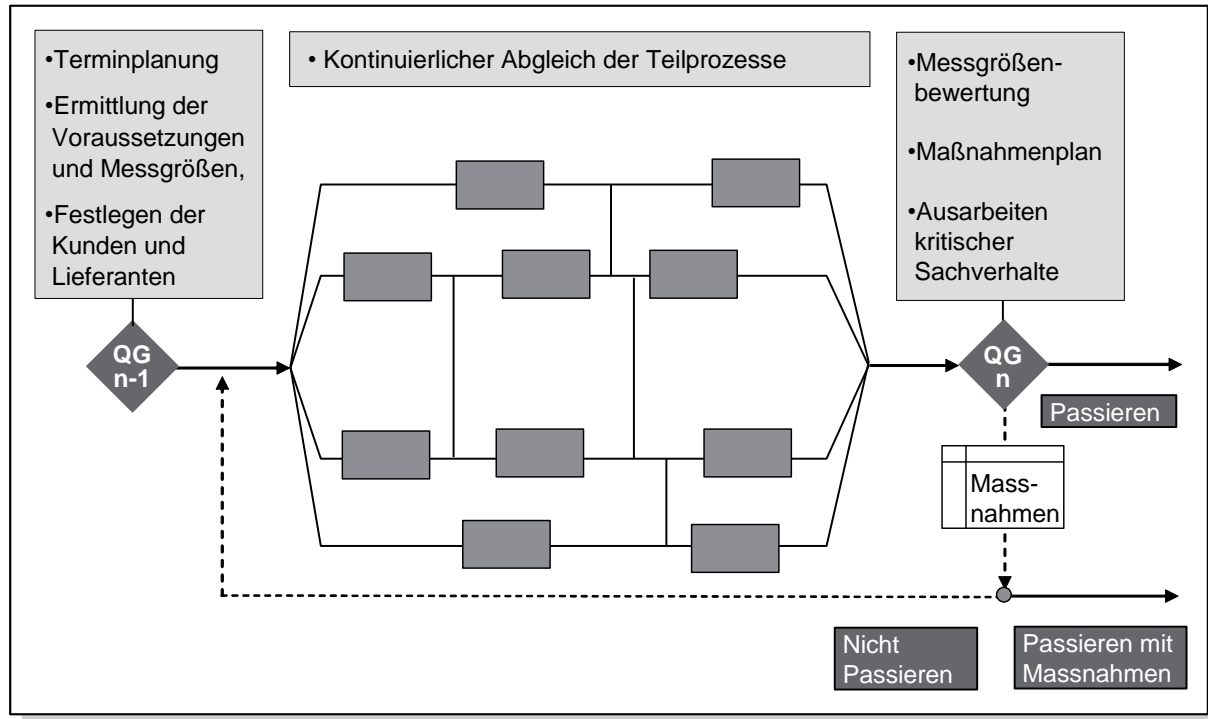


Abbildung 4.4: Quality Gate Prinzip innerhalb der Fahrzeugentwicklung /OSS 00/

Zu Beginn des Prozessabschnittes werden bei Gateway n-1 die messbaren Zielsetzungen und Anforderungen des folgenden Prozessabschnittes im Entwicklungsteam geklärt und festgelegt. Darüber hinaus wird ein detaillierter Prozessablaufplan zum Erreichen des nächsten Quality Gates aufgestellt. Dadurch ist es möglich, bereits zu Beginn des Prozessschrittes den Ablauf der einzelnen Teilschritte abzugleichen und somit die Transparenz zu erhöhen. Während des Prozessschrittes gilt es die Entwicklungsfortschritte innerhalb der einzelnen Module zu verfolgen und zwischen den einzelnen Modulen zu synchronisieren, um damit den Produkt- und Prozessreifegrad zu optimieren. Eine frühe Kommunikation der geänderten Sachverhalte ermöglicht es, Blindleistungen zu reduzieren.

Zur Durchschreitung des Quality Gates n wird die termingerechte und vollständige Qualität der erbrachten Leistung mit Lieferanten und Kunden anhand der gemeinsam definierten Messgrößen bewertet und bei Erfüllung über den weiteren Fortgang bzw. bei Nichterfüllung über weitere Maßnahmen oder Abbruch entschieden. Mit Durchschreiten des Quality Gates n werden weiterhin die

Zielsetzungen und Anforderungen sowie der Prozessablaufplan für das Erreichen des nächsten Quality Gates festgelegt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das beschriebene Prozessmodell auf Basis des Gateway Prinzips ein Führungs- und Steuerungsinstrument zur qualitätsorientierten Planung und Durchführung von Entwicklungsprojekten darstellt, mit dessen Hilfe die Erwartungen des Kunden bezüglich Liefertermin, Fahrzeugqualität und -kosten sichergestellt werden können.

4.1.2 Organisation der Fahrzeugentwicklung

Der Prozess der integrierten Produktentwicklung ist durch ein hohes Maß der Zusammenarbeit aller Prozessbeteiligten geprägt. Vorher sequentiell bearbeitete Aufgaben werden in interdisziplinär zusammengesetzten Teams parallel bearbeitet, um die Entwicklungszeit zu verringern und Fehler frühzeitig zu erkennen. Die mit dem Entwicklungsprojekt beauftragte Organisation und deren Integration im Unternehmen sind auf die optimierte Nutzung der Ressourcen für das Erreichen der Projektziele abzustimmen. Besonders Entwicklungsprojekte von hoher Komplexität erfordern eine gut strukturierte Projektorganisation.

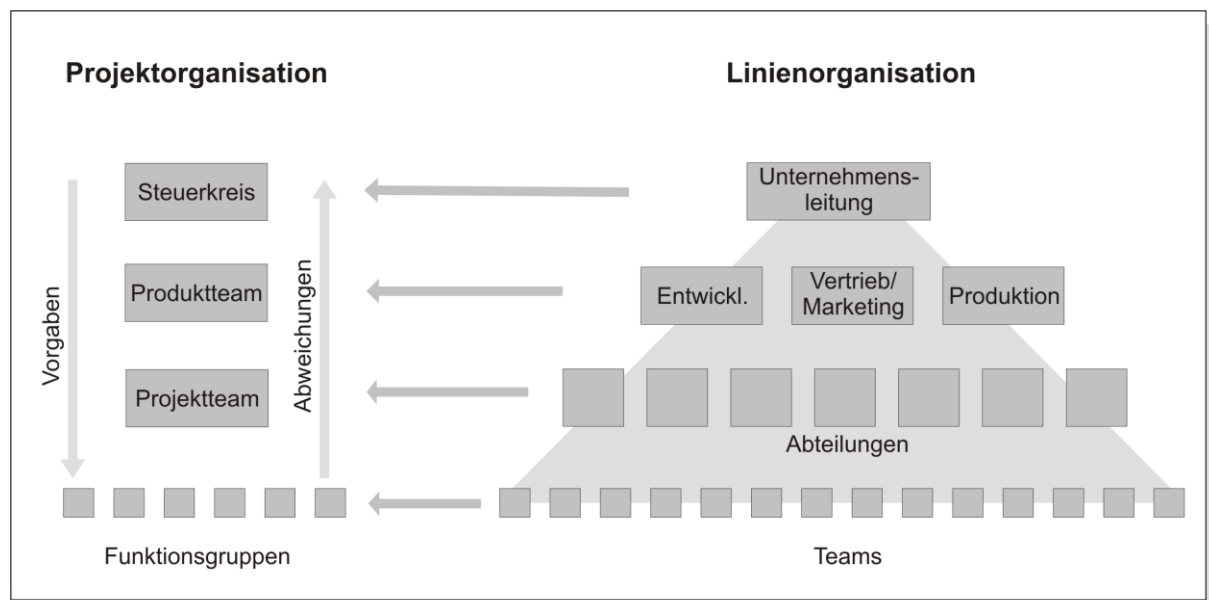


Abbildung 4.5: Projektstrukturierung in der Automobilindustrie /AMB 97/

Die Durchführung von Fahrzeugentwicklungs-Projekten erfolgt in der Regel im Rahmen einer so genannten Matrix-Organisation. Hierbei wird die traditionelle

Linienorganisation durch eine für die jeweilige Entwicklungsaufgabe eingesetzte Projektorganisation ergänzt. Die Projektmitglieder werden aus den unterschiedlichen Fachbereichen temporär zusammengefasst. Aufgrund der hohen Komplexität erfordert auch die Projektorganisation eine hierarchisch strukturierte Zusammenarbeit mehrerer Teams bzw. Gremien /RUP 04/.

Der Fahrzeug-Steuerkreis kann als übergeordnetes Entscheidungsgremium definiert werden. Er setzt sich aus Verantwortlichen der Linienbereiche und Mitgliedern aus der Unternehmensleitung zusammen. Im Steuerkreis werden die Vorgaben für das Projekt definiert, die Verantwortungen festgelegt sowie Entscheidungen getroffen, die projektübergreifende Auswirkungen haben.

Das Projektteam ist verantwortlich für die Projektdurchführung und für das Erreichen der festgelegten Ziele bzgl. Technik, Kosten, Qualität und Zeit. Im Projektteam werden die Aufgaben und Rahmenbedingungen des Projektes definiert, der Ablauf koordiniert sowie die entsprechenden Teammitglieder ausgewählt.

Die Gliederung der Entwicklungsteams erfolgt in der Automobilindustrie baugruppenorientiert in Form so genannter Modul-, bzw. Funktionsgruppen. Zusätzlich werden Querschnittsteams zur Gewährleistung der gesamtheitlichen Erfüllung einer besonders wichtigen Systemeigenschaft (z.B. Qualität, etc.) gebildet.

Die Zusammensetzung der Teams richtet sich im Wesentlichen nach dem zeitlichen und inhaltlichen Projektverlauf sowie der entsprechenden Einbindung von Mitarbeitern unterschiedlicher Bereiche.

Zu Beginn sind im Sinne eines Konzeptteams zur Festlegung der Entwicklungsziele aus Kundensicht vor allem Mitarbeiter aus Marketing und Vertrieb involviert, technische Fachrichtungen wie Fertigung oder Montage bringen vor allem ihr Realisierungs- Know-how ein. Im weiteren Verlauf setzen sich die Entwicklungsteams hauptsächlich aus Mitarbeitern der Konstruktion, Fertigungsplanung, Einkauf, Kostenplanung, Qualitätssicherung und Versuch zusammen. Durch die Vergabe von gesamten Entwicklungsumfängen an sog. Systempartner kommt der Einbindung dieser Lieferanten eine besondere Bedeutung im Rahmen der integrierten Produktentwicklung zu. Die Systempartner sind neben der Entwicklung auch für die Fertigung und ggf. Montage der jeweiligen Baugruppen

verantwortlich. Sie sind deshalb bereits möglichst früh in den Entwicklungsprozess zu integrieren, um schon hier das externe Know-how zu nutzen.

4.1.3 Informationstechnische Hilfsmittel

Um die Ziele der integrierten Produktentwicklung realisieren zu können, ist vor allem eine rechtzeitige Bereitstellung aller für den Konstrukteur erforderlichen Informationen aus dem gesamten Produktentstehungsprozess durch den Einsatz einer integrierten Informationsverarbeitung notwendig.

Für die Bearbeitung einer Konstruktionsaufgabe bzw. die Unterstützung entsprechender Konstruktions- und Planungstätigkeiten sind eine Vielzahl von Einzelprogrammen zur Zeichnungs-, Berechnungs-, Bewertungs- und Informationsbereitstellung verfügbar. Die Anwendung solcher Einzelprogramme durch den Konstrukteur bedeutet bereits eine große Unterstützung, führt aber auch zu unerwünschten Problemen aufgrund inkonsistenter Datenhaltung sowie unterschiedlicher Benutzeroberflächen.

Im Sinne einer integrierten Informationsverarbeitung ist eine Verknüpfung von Einzelprogrammen zu Programmsystemen anzustreben, mit denen der Konstruktionsprozess durchgängig und flexibel unterstützt werden kann. Dies erfordert rechnergestützte Werkzeuge, die zum Teil deutlich über die bloße CAX-Technologie hinausgehen und den vollständigen Informationsfluss für alle Konstruktions- und Entwicklungstätigkeiten sowie für sämtliche Phasen des Produktentstehungsprozesses sicherstellen. Neben der datentechnischen Verknüpfung von Programm Modulen ist eine methodische Unterstützung der Konstrukteure bei der Aufgabebearbeitung erforderlich. Für diese Zielsetzungen liegen Entwicklungen vor, die als Konstruktionsleitsysteme oder Engineering-Data-Management (EDM) Systeme bezeichnet werden. Die methodischen und programmtechnischen Voraussetzungen für solche Systeme sind nach Pahl /PAH 05/:

- ❑ das Vorhandensein eines gemeinsamen rechnerinternen Datenmodells, das alle zur Beschreibung des Produktes und der Produktionsprozesse erforderlichen Daten mit ihren Verknüpfungen enthält. Hierzu zählen insbesondere geometrische, technisch-funktionale, technologische, organisatorische und baustrukturelle Informationen.

- ❑ Operationsmethoden für Analyse-, Such-, Kombinations-, Auswahl-, Berechnungs-, Simulations- und Bewertungsschritte sowie leistungsfähige Modellierungsprogramme (CAD, DMU, etc.).
- ❑ Ein Datenbankverwaltungssystem einschließlich einer Daten- und Wissensbank, mit dem alle Kommunikations-, Steuer- und Konstruktionsdaten sowie Konstruktionsmethoden gespeichert und bereitgestellt werden können.
- ❑ Anwenderfreundliche Benutzerschnittstellen sowie Ein- und Ausgabemethoden mit denen der Konstrukteur effizient arbeiten kann.

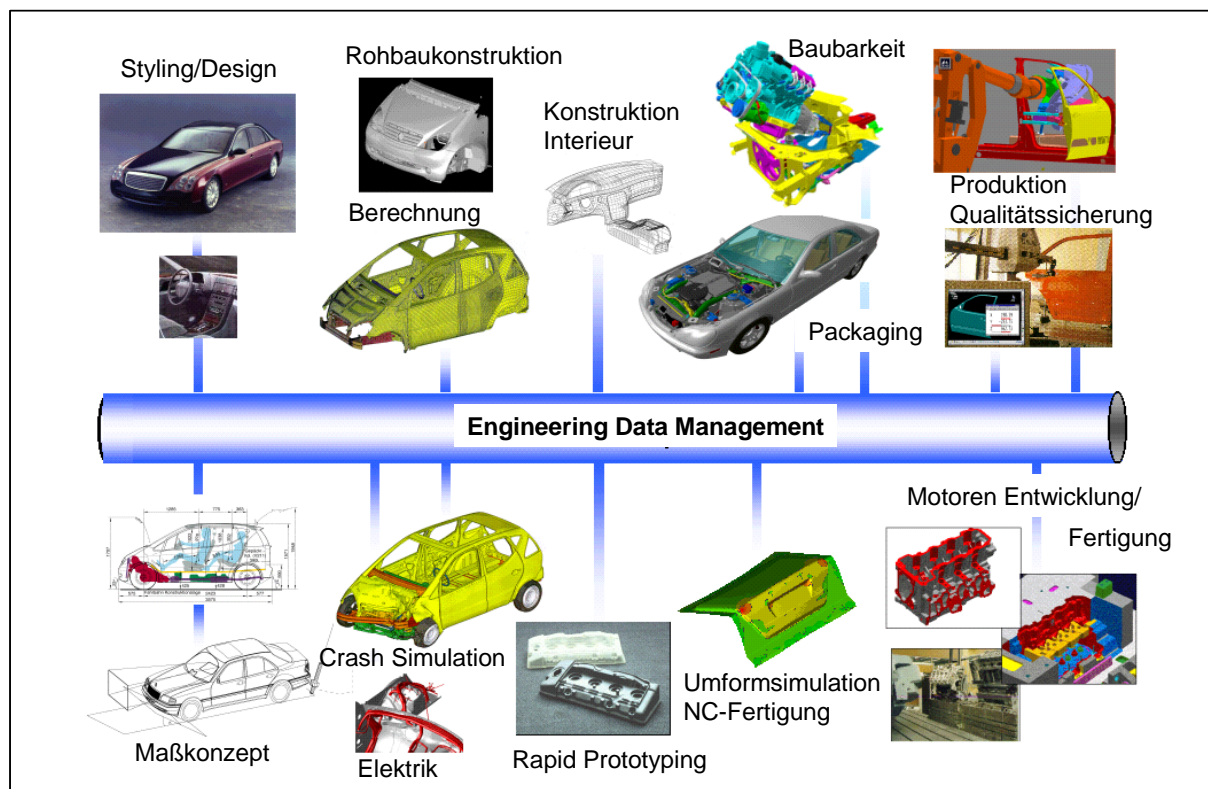


Abbildung 4.6: Engineering Data Management in der Automobilindustrie /BAL 01/

Abbildung 4.6 zeigt die Inhalte eines EDM-Systems für den gesamten Produktentstehungsprozess am Beispiel der Automobilindustrie /BAL 01/. Die traditionell hardwaregetriebene Fahrzeugentwicklung wird dabei immer stärker durch Untersuchungen auf digitaler Basis ergänzt, optimiert und beschleunigt. Virtual Reality und andere Simulationstechniken werden hierzu konsequent in den Produktentstehungsprozess integriert. Mit der durchgängig digitalen und zugleich visuellen Aufbereitung der Daten vom Design bis hin zur Produktions- und Fabrikplanung wird sehr schnell ein hoher Reifegrad erzielt. Von der ersten Idee bis zur Markteinführung kann damit ein Fahrzeug deutlich schneller entwickelt und gleichzeitig die Qualität der Arbeitsprozesse optimiert werden.

4.2 Recyclinggerechte Produktentwicklung – Stand der Technik

Die erfolgreiche Umsetzung einer integrierten Produktentwicklung erfordert, wie zu Beginn dieses Kapitels gezeigt, das optimale Zusammenspiel der Faktoren Ablauf-, Aufbauorganisation und Rechnerhilfsmittel. Nur somit lassen sich die geforderten Zeit-, Qualitäts- und Kostenvorteile bei der Produkterstellung realisieren.

Die Forschungsschwerpunkte lagen bislang bei der Integration aller am Produkt-erstellungsprozess beteiligten Bereiche aus Entwicklung, Produktion und Vertrieb. Neben diesen traditionellen Faktoren haben in den letzten Jahren zunehmend umweltrelevante Merkmale bei der Produktentwicklung an Bedeutung gewonnen. Hierbei haben insbesondere die Probleme bei der Produktentsorgung zu einer verstärkten Anstrengung um recyclinggerechte Produktgestaltung geführt. Im Folgenden werden die bestehenden Ansätze zur Einbindung von Recycling-erfordernissen in die Produktentwicklung aufgezeigt. Um die Zuordnung zu den beschriebenen Bausteinen der Fahrzeugentwicklung herzustellen, werden die bestehenden Ansätze nach ablauf-, aufbau- und informationstechnischen Methoden gegliedert.

4.2.1 Recyclingaspekte im Entwicklungsprozess

Ansätze zur Einbindung von Recyclinganforderungen in die Produktentwicklung im Sinne einer recyclinggerechten Gestaltung von Produkten sind bisher in umfangreicher Anzahl vorhanden. Sie stellen eine wichtige Unterstützung des Entwicklers dar, da sie in Form von konstruktiven Empfehlungen eine Hilfestellung zur recyclinggerechten Produktgestaltung geben. Die Umsetzung erfolgt zumeist in Tabellen, Checklisten oder wissensbasierten Systemen, die über spezifische Merkmale von Werk- und Altstoffen sowie von Verbindungselementen informieren und die Entscheidungsfindung im Konstruktionsprozess erleichtern /MEY 83, SUH 96, BOP 94, TOB 93, KAH 96/.

Die VDI Richtlinien -Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte /VDI 93/ und Recyclingorientierte Produktentwicklung /VDI 9222/- können dabei als das wichtigste Hilfsmittel bezeichnet werden. Entlang des Entwicklungsablaufes werden konkrete Gestaltungsregeln genannt, um die Recycleeigenschaften von Produkten zu verbessern (siehe Abbildung 4.7).

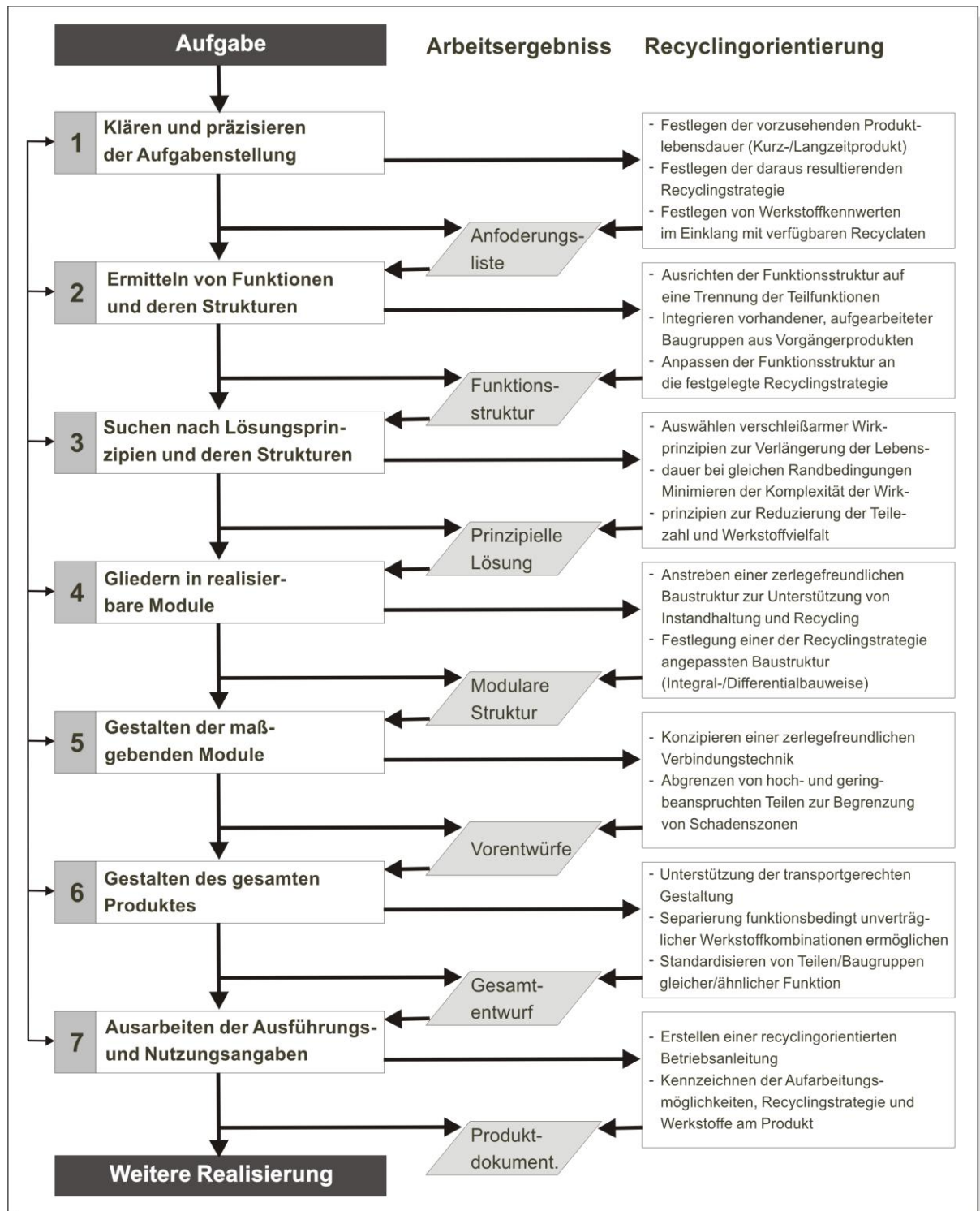


Abbildung 4.7: Recyclingbezogene Aufgaben bei der Entwicklung /VDI 93/

Renken stellt aufbauend auf den allgemeingültigen Empfehlungen nach VDI 2243 einen PKW-spezifischen Ablaufplan zur Entwicklung recyclinggerechter Automobilkomponenten vor /REN 96/. Er bezieht sich im wesentlichen auf die Gestaltungsregeln des recyclinggerechten Konstruierens und stellt branchenspezifische

Empfehlungen zur Auswahl recyclingfreundlicher Verbindungstechniken, Reduzierung der Materialvielfalt oder Änderungen von Baustrukturen zur Reduzierung von Demontagezeiten vor.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Neumann, der aufbauend auf eine Fragebogen-erhebung Leitregeln zum Konstruieren recyclinggerechter Automobilbauteile ableitet und diese in den Konstruktions- und Entwicklungsprozess als Checkliste für den Konstrukteur einbindet /NEU 96/.

Suhr entwickelt ein Konzept für ein wissensbasiertes System, welches den Konstrukteur in allen Phasen der Produktentwicklung unterstützt. Durch eine produktunabhängige Gliederung wird die Anwendung auf alle Gebiete des recyclingorientierten Gestaltens ermöglicht /SUH 96/. Eine umfassende Unterstützung ist allerdings nur unter großem Aufwand zu realisieren.

Der Nachteil der beschriebenen Methoden ergibt sich vor allem durch die starke Fokussierung auf die Gestaltungsmerkmale des Produktes. Da die Analysen der jeweiligen Recyclingverfahren nicht oder nur teilweise mit in die Bewertung und die Ableitung von konstruktiven Merkmalen miteingebunden sind, bedarf die jeweilige Empfehlung einer fallspezifischen Überprüfung. So ist beispielsweise die Auswahl einer „recyclinggerechten“ Verbindungstechnik (z.B. Schrauben anstelle von Nieten) nur dann sinnvoll, wenn der nachgeschaltete Recyclingprozess die Demontage des Bauteiles überhaupt notwendig macht.

Einen weiterführenden Ansatz, welcher diese Anforderungen berücksichtigt, beschreibt Dieterle /DIE 95/. Das Konzept beruht auf einer Modularisierung des Produktes in so genannte Recyclinggruppen, denen dann geeignete Recyclingverfahren zugeordnet werden können. Die Festlegung des Recyclingkonzeptes erfolgt dabei zunächst an Vorgängerprodukten. Das so gewonnene Recyclinggrundkonzept kann dann auf die nachfolgende Produktgeneration übertragen werden. Damit können bereits frühzeitig die entsprechenden Anforderungen an die jeweiligen Recyclinggruppen des Produktes festgelegt werden. Nach welchen Kriterien die Auswahl der geeigneten Recyclingverfahren erfolgen soll, bleibt jedoch offen.

Freitag stellt am Beispiel eines Elektronikbauteiles eine Methode zur recycling-orientierten Qualitätsplanung vor [FRE 00]. Dabei werden die Recyclinganforderungen direkt in die bei der Entwicklung angewandten Qualitätsplanungsmethoden wie QFD und FMEA integriert. Als Grundlage für die Ermittlung der Recyclinganforderungen wurde ein Recyclingprozessmodell erstellt, welches die relevanten Prozesse des Elektronikschrott-Recyclings formal beschreibt.

Gemeinsames Merkmal der beschriebenen Konzepte ist die unzureichende Berücksichtigung der Planungsmethoden zur Zieldefinition in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Dieser Phase kommt aber für die Gestaltung des Produktes eine ganz wesentliche Bedeutung zu, da die Bewertung der Produktkonzepte nach ihrer Recyclinggerechtigkeit letztendlich nur anhand der festgelegten Zielsetzungen vorgenommen werden kann. Die Analyse von zukünftigen Einflussfaktoren wie neue Recyclingtechnologien oder Änderungen in der Gesetzgebung sind dabei ein wesentlicher Gesichtspunkt. Dies gilt insbesondere für Produkte, bei denen zwischen der Entwicklung und der Entsorgung eine erhebliche Zeitspanne liegt.

Neben den Defiziten bei der Ableitung der Zielsetzungen fehlen in den nachgeschalteten Entwicklungsphasen einheitliche Prozesse zur konsequenten Zielverfolgung. Entsprechend dem beschriebenen Quality Gate Prinzip ist hierzu eine einheitliche Vorgehensweise notwendig, welche die Entwicklungsfortschritte innerhalb der einzelnen Fahrzeugmodule verfolgt und zwischen den einzelnen Modulen synchronisiert. Dabei sind insbesondere die unterschiedlichen Einflussmöglichkeiten auf eine recyclinggerechte Gestaltung von komplexen Produkten in den beschriebenen Methoden derzeit nicht ausreichend berücksichtigt. Je nach Konstruktionsart ergeben sich jedoch erhebliche Unterschiede. Werden beispielsweise komplette Teilumfänge eines neu zu konstruierenden Produktes aus bestehenden Konzepten übernommen, so können diese nur bedingt nach Recyclinggesichtspunkten konstruktiv umgestaltet werden.

4.2.2 Organisation der recyclinggerechten Produktentwicklung

Neben der Einbindung des Recyclings in die Ablauforganisation der Produktentwicklung ist die Verankerung der Aufgaben in der Aufbauorganisation ein wesentliches Merkmal für die erfolgreiche Umsetzung einer Recyclinggerechten

Konstruktion. Dabei gilt es unter optimaler Ausnutzung der Ressourcen eine durchgängige Bereitstellung des notwendigen Recyclingwissens sicherzustellen.

Die bislang vorhandenen Konzepte zur organisatorischen Einbindung des Recyclings gehen davon aus, dass der Konstrukteur als zentraler Verantwortlicher für die Gestaltung des Produktes auch dessen Recyclingkonzept festlegt. Dieser Ansatz ist jedoch im Zuge zunehmender Anforderungen an die Konstruktionsabteilungen (kosten-, montage-, servicegerechte Produktgestaltung) nur schwer umsetzbar, da es ein hohes Maß an Expertenwissen voraussetzt.

Weiterführende Konzepte fordern daher im Sinne eines Simultaneous engineering die Erweiterung des Entwicklungsteams um einen Recyclingexperten, welcher innerhalb des Teams u.a. für die Werkstoffauswahl und Festlegung des Recyclingkonzeptes verantwortlich ist /DIE 95, WIT 92/. Die Umsetzung soll mit Hilfe externer Berater, Kooperationen mit Recyclingunternehmen oder durch interne Verankerung innerhalb des Unternehmens erfolgen.

Für die Einbindung des Recyclingwissens innerhalb wenig komplexer Aufbauorganisationen erscheint dieser Ansatz sinnvoll. Die Übertragung auf die in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Organisationsformen der Fahrzeugentwicklung erfordert jedoch zusätzliche Maßnahmen, welche das notwendige Fachwissen mit minimalem Aufwand an Ressourcen durchgängig in mehrere, teilweise parallel laufende Projektorganisationen einbindet.

4.2.3 Hilfsmittel zur recyclinggerechten Produktentwicklung

Das Entwicklungsteam hat die Aufgabe, das Produkt so zu entwerfen, dass es allen Anforderungen „optimal“ entspricht. Hinsichtlich neuer Automobilbauteile und/oder Konzepte bedeutet eine solche optimale Lösung das geeignete Zusammenführen und Ausbalancieren umweltlicher Forderungen, technologischer Möglichkeiten und ökonomischer Zwänge. Um ein Optimum finden zu können, müssen die Auswirkungen der möglichen Lösungsvarianten auf die Erfüllung der Gestaltungsziele quantifiziert und vergleichbar gemacht werden /PAH 05/.

Übertragen auf die Bewertung der Recyclinggerechtigkeit eines Produktes bedeutet dies, dass ausgehend von den Zielvorstellungen die unterschiedlichen Demontage-

und Recyclingmöglichkeiten des Produktes ermittelt und quantifiziert werden müssen. Erst danach können die optimalen Lösungen bestimmt und mögliche Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden. Dabei ist neben den geeigneten Bewertungsmethoden auch das Vorhandensein von konsistenten Datenmodellen erforderlich, welche die zur Beschreibung des Produktes und der Recyclingprozesse notwendigen Daten mit ihren Verknüpfungen enthält. Die bestehenden Ansätze zur Bewertung der Recyclinggerechtigkeit von Produkten erfüllen diese Anforderungen jedoch nur bedingt.

Wende entwickelt ein Modell zur Bewertung und Optimierung der Recyclinggerechtigkeit von Produkten mit Hilfe der Produktfolgenabschätzung /WEN 91/. Dabei werden entlang des Entwicklungsablaufes nach VDI 2221 /VDI 93-1/ für jede Phase recyclingbezogene Bewertungskriterien (z.B. geringer Demontageaufwand, Anzahl der Werkstoffe minimieren, etc.) bereitgestellt. Die Auswahl und Gewichtung der Kriterien sowie die Abschätzung der Zielerfüllung erfolgt durch den Konstrukteur mit Hilfe eines Systems der Punktevergabe. Das Programm errechnet automatisch den Wert der jeweiligen Lösung. Ähnliche Bewertungssysteme werden von Simon und Hartel beschrieben /SIM 93, HAR 94/.

Der Vorteil dieser qualitativen Bewertungsinstrumente ist die durchgängige Berücksichtigung von recyclingrelevanten Konstruktionskriterien während des gesamten Entwicklungsprozesses. Es können damit potentielle Schwachstellen des Produktes frühzeitig aufgedeckt und alternative Konstruktionslösungen abgeleitet werden. Aufgrund fehlender quantitativer Bewertungskriterien sind die Ansätze jedoch nicht geeignet, ein Produkt objektiv und nachvollziehbar hinsichtlich seiner recyclingbezogenen Zielsetzungen zu bewerten.

Neumann entwickelt ein Konzept für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Recyclings von Automobilkomponenten (Kreislaufeignung) /NEU 96/. Basis für die Bewertung ist der im Rahmen einer Demontageanalyse erstellte Demontagestrukturbaum des Produktes. Einflussgrößen für die Bewertung der einzelnen Bauteile sind die Demontagekosten, Sammelkosten, Aufbereitungskosten, der Materialwert sowie die Entsorgungskosten. Die kreislauff geeigneten Komponenten werden festgelegt, indem der ermittelte Wert einem vorher festgelegten Wertebereich (R1, R2, R3) zugeordnet wird. Ein auf diesem Ansatz aufbauendes Konzept wird auch von Boes /BOE 00/ vorgestellt.

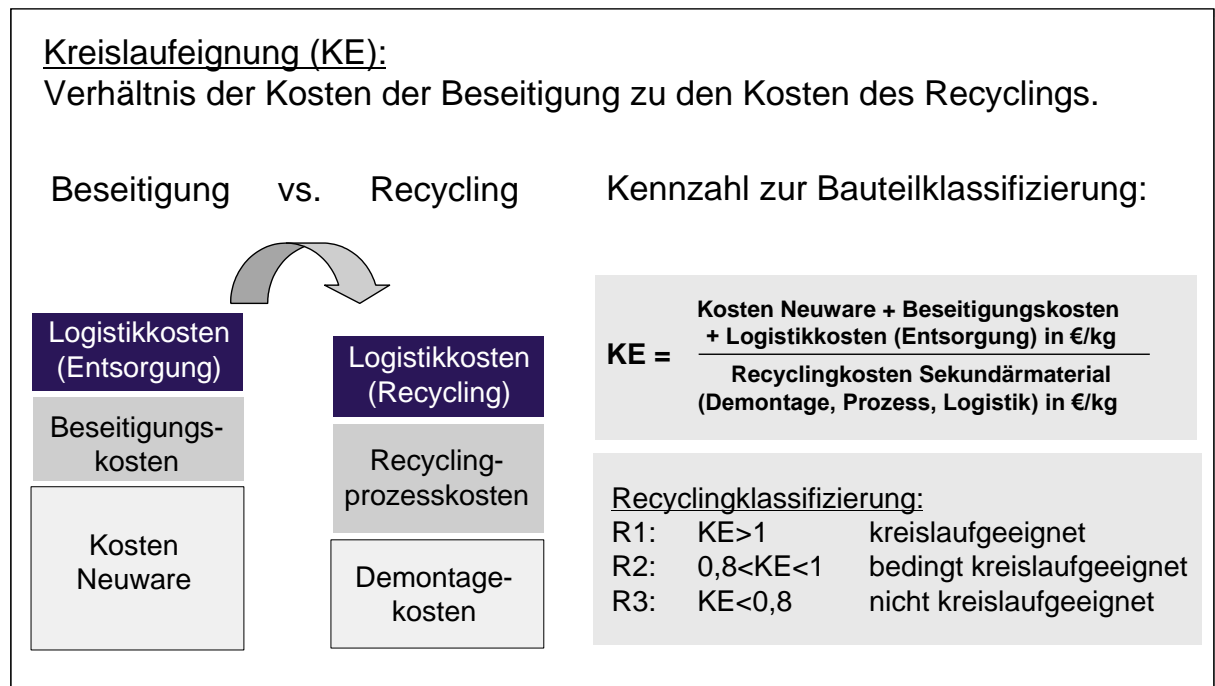


Abbildung 4.8: Kreislaufeignung von Automobilkomponenten /NEU 96/

Das von Neumann vorgeschlagene Konzept eignet sich nur bedingt zur Abschätzung der Recyclinggerechtigkeit von Automobilkomponenten. Das Problem besteht darin, dass die Bestimmung der Kreislaufeignung für jedes Einzelteil separat erfolgt und somit isoliert von der Untersuchung der Recyclingmöglichkeiten von demontierten (Teil-) Fraktionen vorgenommen wird. Dies wäre nur dann zulässig, wenn es sich bei dem zugeordneten Verwertungsweg um den optimalen Verwertungsweg handeln würde. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die Darstellung des Demontageablaufes in Form des Demontagestrukturbaumes. Methodisch bedingt kann dabei nur eine bestimmte Auswahl von Demontagemöglichkeiten berücksichtigt werden. Des Weiteren fehlt ein Ansatz zur rechnergestützten Ableitung der Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes, so dass jede Variationsmöglichkeit separat analysiert werden muss.

Meedt entwickelt Methoden und Werkzeuge, welche den Konstrukteur bei der Festlegung der Recyclingstrategie für sein Produkt unterstützen sowie dessen demontagegerechte Auslegung ermöglichen /MEE 95/. Auf Basis von Produktinformationen und der Kosten/-Erlössituation bei der Verwertung wird mit einem Softwaresystem (Recyclinggraph-Editor) die Demontageplanung unterstützt. Dabei werden sämtliche Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes rechnergestützt ermittelt. Entsprechend den Ergebnissen werden dann Steuer-

sequenzen für die eine Demontagezelle generiert, in der mit Hilfe zweier Industrieroboter die Produkte automatisch demontiert werden können. Dadurch lässt sich eine durchgängige Design-Disassembly Verfahrenskette realisieren.

Kriwet entwickelt eine Methode, welche die quantitative Bewertung der Recyclinggerechtigkeit von Produkten ermöglicht /KRI 94/. Der Ansatz basiert auf einer rechnergestützten Erfassung und automatisierten Bewertung aller Recyclingmöglichkeiten für ein Produkt. Das zentrale Element ist ein so genannter Rückgewinnungsgraph, welcher auf der AND/OR Graphentheorie basiert (siehe Abbildung 4.9). Um die Bewertung automatisiert durchführen zu können, wurde ein Zielsystem entwickelt, welches auch Unsicherheiten im Hinblick auf die langen Zeitspannen zwischen Entsorgung und Konstruktion abbilden kann (Nutzentheorie). Unter Berücksichtigung der formulierten Anforderungen an die Bewertungsaufgabe stellen die Ansätze von Kriwet und Meedt die bisher geeignetsten Lösungen dar, da die Bewertung auf Basis sämtlicher Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes erfolgt.

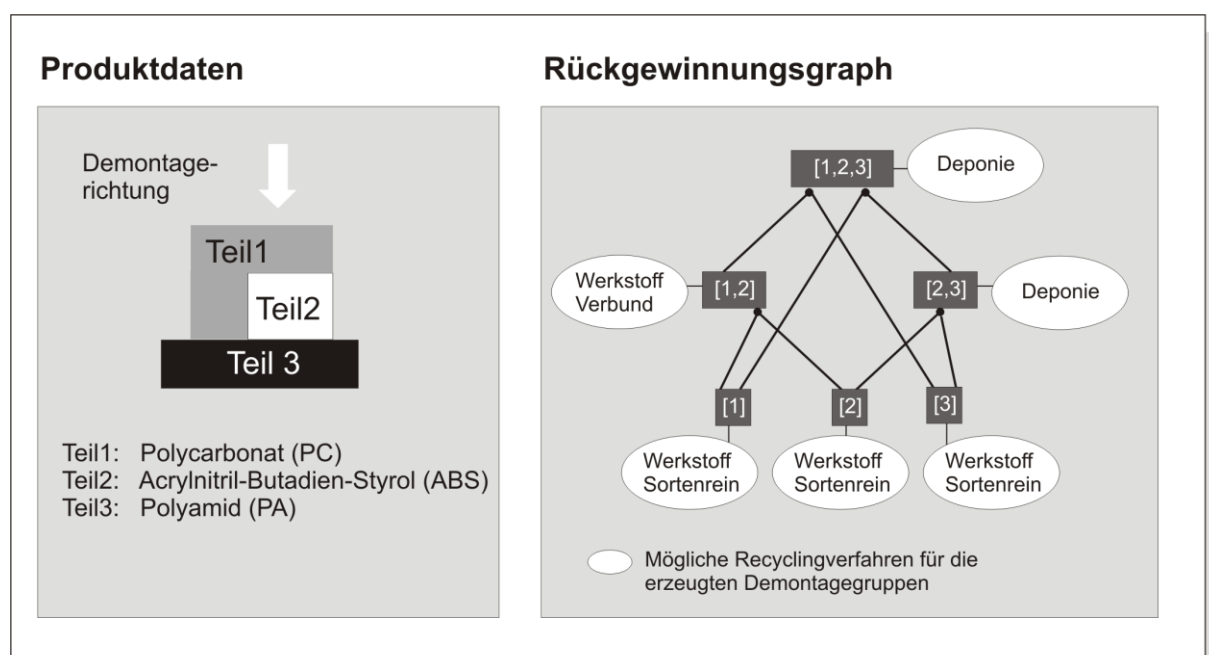


Abbildung 4.9. Rückgewinnungsgraph /KRI 94/

Die beschriebenen Konzepte umfassen ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Gemeinsames Merkmal jedoch ist die unzureichende Einbindung der Systeme in die Produktentwicklung. Es fehlen insbesondere praktikable Lösungen, die eine Anbindung von recyclingorientierten Bewertungsinstrumenten sowohl an die

Ablauforganisation der Entwicklung als auch an die bestehenden Produkt-Datenmodelle ermöglichen. Die vorhandenen Softwarelösungen wurden bislang vor allem anhand einfacher Produktaufbauten verifiziert, so dass die Übertragung der Ansätze auf komplexe Produkt Strukturen wie PKW nicht ausreichend adaptiert sind.

Ein weiterer Nachteil der beschriebenen Ansätze ergibt sich durch die Beschränkung des auswählbaren Bewertungsraumes. Der Fokus lag bislang vor allem auf der Wirtschaftlichkeit des Recyclings. Als Bewertungskriterium wurde demnach die Minimierung der bei der Verwertung der Produkte entstehenden Kosten berücksichtigt. Zur Erfüllung der Zielsetzungen gemäß Altfahrzeugverordnung sind neben der Wirtschaftlichkeit des Recyclings jedoch auch die Verwertungsquoten als Bewertungskriterium zu implementieren.

4.3 Zusammenfassung

Um die Zielsetzungen aus der Altfahrzeugrichtlinie sicherzustellen, ist die möglichst frühzeitige Berücksichtigung der Recyclinganforderungen im Rahmen der PKW-Entwicklung unabdingbar. Wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung ist dabei das optimale Zusammenspiel der Faktoren Ablauf-, Aufbauorganisation und Rechnerhilfsmittel.

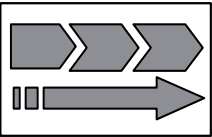
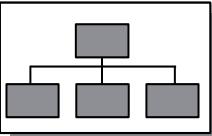

Analyse aktueller Stand zur recyclinggerechten Produktentwicklung	
 <p>Ablauforganisation</p>	<p>Bislang: - Starke Fokussierung auf die Gestaltungsmerkmale des Produktes (recyclinggerechte Verbindung, Baustruktur, Werkstoffauswahl) in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses.</p> <p>Ziel: - Einbindung der Recyclinganforderungen unter Berücksichtigung von zukünftigen Einflussfaktoren in den frühen Entwicklungsphasen.</p>
 <p>Aufbauorganisation</p>	<p>Bislang: - Konstrukteur als zentraler Verantwortlicher für die Gestaltung des Produktes und seines Recyclingkonzeptes.</p> <p>Ziel: - Hohes Maß an dezentralem Expertenwissen erforderlich.</p> <p>- Organisationsform, welche das notwendige Fachwissen mit minimalen Aufwand an Ressourcen durchgängig in mehrere, parallel laufende Entwicklungsprojekte integriert.</p>
 <p>Rechnerhilfsmittel</p>	<p>Bislang: - „Stand-alone“ Lösungen zur wirtschaftlichen Bewertung der Recyclingeignung für einfache Produktaufbauten.</p> <p>Ziel: - Einbindung der Bewertungsinstrumente in die bestehende Ablauforganisation und Kopplung an die bestehenden Produktdaten.</p> <p>- Berücksichtigung von Recyclingquoten als Bewertungskriterium.</p>

Abbildung 4.10: Analyse aktueller Stand zur recyclinggerechten Produktentwicklung

Die durchgeführte Analyse des aktuellen Standes zur recyclingorientierten Produktentwicklung zeigt auf, dass innerhalb der einzelnen Bausteine -Methoden, Rechnerhilfsmittel und organisatorische Maßnahmen- noch Defizite festzustellen sind, insbesondere aber das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten bislang nicht durchgängig umgesetzt ist (siehe Abbildung 4.10). Der sich daraus ableitbare Handlungsbedarf zur Berücksichtigung der Recyclinganforderungen innerhalb der PKW-Entwicklung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Im Rahmen der Ablauforganisation ist eine Planungsmethodik zu entwickeln, welche die Ableitung von Recyclingzielen in der frühen Phase der Produktentwicklung unterstützt. Dabei ist insbesondere die Analyse von zukünftigen Einflussfaktoren wie neue Recyclingtechnologien oder Änderungen in der Gesetzgebung ein wesentlicher Gesichtspunkt.
2. Bei den nachfolgenden Phasen der Entwicklungsprozesse sind einheitliche Vorgehensweisen zur konsequenten Zielverfolgung aufzubauen, die gemäß dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Quality Gate Prinzip die Entwicklungsfortschritte innerhalb der einzelnen Fahrzeugmodule verfolgen und zwischen den einzelnen Fahrzeugmodulen synchronisieren. Dabei sind die unterschiedlichen Einflussmöglichkeiten für die recyclinggerechte Gestaltung von komplexen Produkten entsprechend den unterschiedlichen Konstruktionsarten zu berücksichtigen.
3. Für die organisatorische Verankerung der Aufgaben ist eine an diese Planungsmethode gekoppelte Aufbauorganisation zu entwickeln. Unter Berücksichtigung der komplexen Organisationsformen innerhalb der Automobilindustrie ist das notwendige Fachwissen mit minimalem Aufwand an Ressourcen durchgängig in mehreren, teilweise parallel laufende Projektorganisationen einzubinden.
4. Die informationstechnische Integration erfordert den Aufbau eines Bewertungsinstrumentes zum rechnergestützten Ableiten der Demontage- und Recyclingmöglichkeiten eines PKW. Da die vorhandenen Softwarelösungen bislang vor allem anhand einfacher Produktaufbauten verifiziert wurden ist eine Übertragung der Ansätze auf komplexe Produktstrukturen durchzuführen. Dabei ist sowohl die Einbindung der Systeme in die methodische Ablauforganisation der Entwicklung, als auch die Ankopplung an bestehende Produktdatenmodelle sicherzustellen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Berücksichtigung von Recyclingverfahren und Verwertungsquoten als Bewertungskriterium bei der Entscheidungsfindung. Hierzu sind die erforderlichen Prozesse des Altfahrzeugrecyclings zu strukturieren und einheitlich in das Bewertungsinstrument zu implementieren.

5 Konzept zur recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung

Aufbauend auf dem aktuellen Stand der Konstruktionsmethoden zur Einbindung von Recyclinganforderungen einerseits und dem Handlungsbedarf zur Umsetzung der Altfahrzeugrichtlinie andererseits wird im Folgenden Kapitel ein Gesamtkonzept vorgestellt, welches die effektive und effiziente Umsetzung der gesetzlichen Ziele im Sinne einer recyclingintegrierten Produktentwicklung unterstützt.

5.1 Gesamtkonzept

Die wesentlichen Probleme bei der Entwicklung recyclinggerechter Automobile ergeben sich bislang vor allem aus der unzureichenden Bereitstellung von Informationen über die möglichen Demontage- und Recyclingprozesse am Lebensende des Fahrzeuges. Mit den derzeit zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln sind die Konstrukteure nicht in der Lage, die Produkte bzgl. den recyclingbezogenen Zielsetzungen gemäß Altfahrzeugverordnung quantitativ zu bewerten, Schwachstellen zu ermitteln und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Neben den Defiziten bei der Informationsbereitstellung fehlen insbesondere durchgängige Konzepte, die eine systematische Einbindung der mit der Recyclingintegration verbundenen Planungsaufgaben in die Ablauf- und Aufbauorganisation von Fahrzeugentwicklungsprojekten ermöglichen, um somit die Recyclinginformationen auch nutzbar zu machen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik zu entwickeln, die im Sinne einer integrierten Vorgehensweise die Einbeziehung der Erfordernisse des Recyclings in die Fahrzeugentwicklungsprojekte ermöglicht. Das Gesamtkonzept wird hierzu in vier Bausteine gegliedert, die als kombiniert zu verwendende Komponenten betrachtet werden sollen. Dies sind:

- ein methodisches Vorgehensmodell, das die Einbindung der Recyclinganforderungen am bestehenden Fahrzeugentwicklungsablauf ausrichtet und in Phasen zunehmender Konkretisierung unterteilt,
- ein Problemlösezyklus, der in den einzelnen Phasen bei der Lösung der recyclingbezogenen Planungsaufgaben im Sinne eines formalen Vorgehensleitfadens durchlaufen wird,

- eine Unterstützung dieses Problemlösezyklusses durch ein geeignetes Planungsinstrument zur Simulation und Bewertung möglicher Demontage- und Recyclingprozesse eines Fahrzeuges,
- eine Organisationsform, die es ermöglicht das Recyclingwissen in die Entwicklungsabläufe zu integrieren und mit allen am Prozess beteiligten Instanzen zeitlich und inhaltlich abzustimmen.

Das Gesamtkonzept versteht sich somit als Bindeglied zwischen der eigentlichen Durchführung des Recyclings am Lebensende des Fahrzeuges und der effektiven und effizienten Einbindung dieses Recyclingwissens bei der Entwicklung eines Neufahrzeuges. Die wesentliche Schnittstelle hierzu stellt ein Planungsinstrument dar, mit dem bereits bei der Entwicklung des Fahrzeuges die verschiedenen Demontage- und Recyclingmöglichkeiten abgebildet und bewertet werden können.

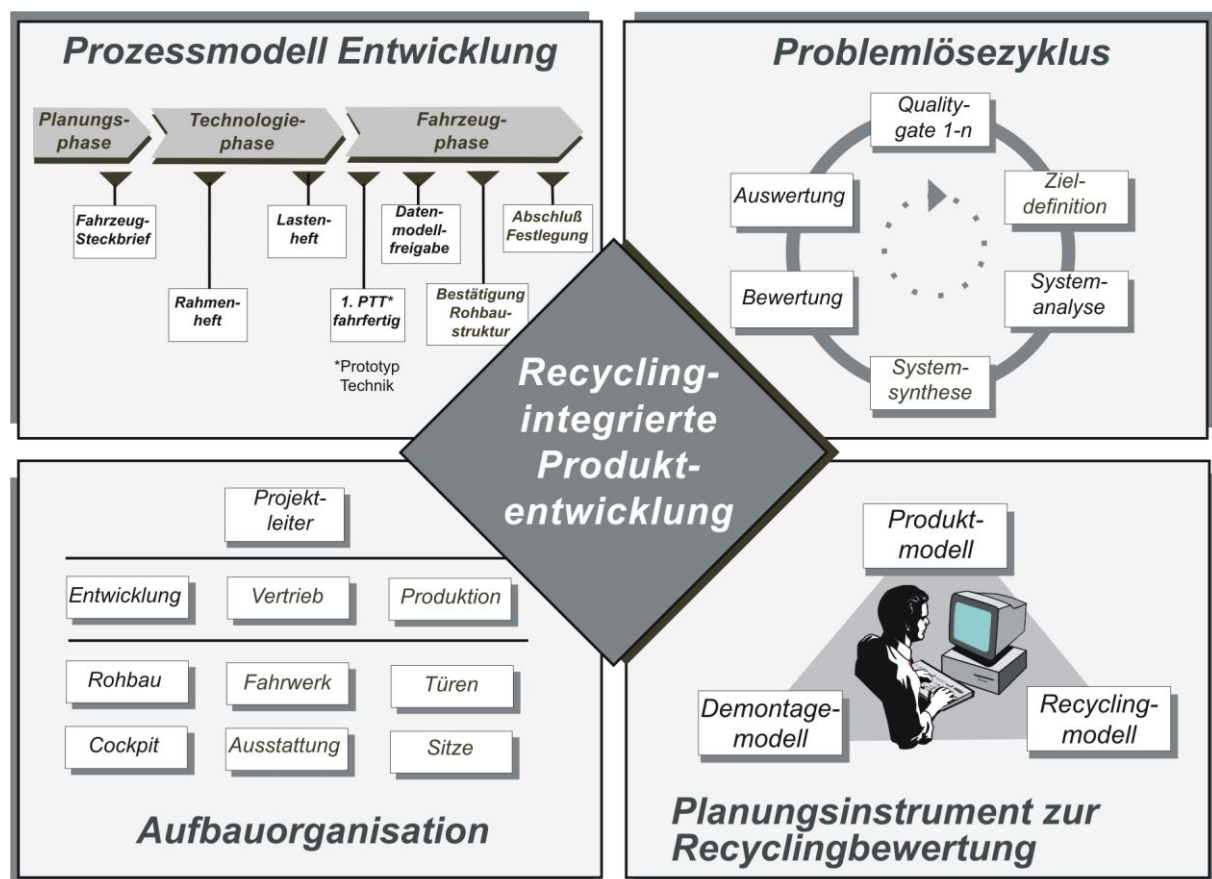


Abbildung 5.1: Bausteine der Recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung

In seinem Gesamtaufbau orientiert sich das Konzept an den Grundelementen der integrierten Produktentwicklung. Dies gewährleistet eine optimale Einbindung in die bestehende Ablauf- und Aufbauorganisation der Fahrzeugentwicklungsprojekte. Die einzelnen Bausteine des Gesamtkonzeptes werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Abschnitt 5.2 beschreibt zunächst die Aufgabenschwerpunkte der einzelnen Konstruktionsphasen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 5.3 und 5.4 der Recycling-Problemlösezyklus sowie die Strukturierung und Funktionalität des zugehörigen Planungsinstrumentes anhand von einzelnen Beispielen erläutert. Abschnitt 5.5 stellt die Aufbauorganisation zur Implementierung des Recyclingwissens in die Produktentwicklung vor.

5.2 Prozessmodell der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung

Die Untergliederung der Fahrzeugentwicklung in einzelne Konstruktionsphasen hat den Zweck, den Werdegang der Konstruktionslösungen in überschaubare Teiletappen zu gliedern und ermöglicht damit einen stufenweisen Planungs-, Entscheidungs- und Konkretisierungsprozess mit vordefinierten Messgrößen und Meilensteinen. Dieses Phasenmodell stellt das Grundgerüst für die Einbindung von Recyclerfordernissen in den Produktentwicklungsprozess dar. Das Ziel ist es, eine systematische Vorgehensweise zu entwickeln, die die Planungsgenauigkeit und –sicherheit bei der recyclingintegrierten Produktentwicklung und somit auch die Qualität, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit bei der Durchführung des Fahrzeugrecyclings erhöht.

Hierbei ist von besonderer Bedeutung, dass bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eine strukturierte Einbindung der Recyclerfordernisse erfolgt um somit mögliche und später nur schwer korrigierbare Fehlentscheidungen von vornherein zu vermeiden. Die Produktentwicklung steht jedoch vor dem Problem, dass zwar die Produkteigenschaften in den frühen Phasen, also in der Planungsphase am stärksten beeinflusst werden können und somit der Änderungsaufwand noch am geringsten ist, im allgemeinen die Erkenntnismöglichkeiten über die festzulegenden Produkteigenschaften gerade in diesen Phasen am geringsten ist. Dies gilt insbesondere bei der Einbindung der Recyclerfordernisse in die Produktentwicklung, da die detaillierten Erkenntnisse über die Recyclingeigenschaften des Fahrzeuges erst nach der Nutzungsphase, d.h. erst 15-20 Jahre nach dessen Entwicklung, gewonnen werden können.

Zur Lösung dieses Problems haben sich diejenigen Ansätze bewährt, die durch einen Informationsrückfluss aus Vorgänger- oder ähnlichen Produkten das Erkenntnisniveau in diesen frühen Phasen anheben, so dass ein Teil der Produkteigenschaften des Nachfolgeproduktes bereits zu diesem frühen Zeitpunkt realistisch vorausgesagt werden kann /EHR 03/.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen ist es möglich, konkrete Optimierungspotentiale für das neu zu entwickelnde Produkt zu bestimmen. Dieser Ansatz soll auch bei der Einbindung der Recyclerfordernisse in die Fahrzeugentwicklung angewandt werden. Dies bedeutet, dass bereits in der Planungsphase die Recyclingeigenschaften eines Fahrzeuges anhand von Vorgänger- oder ähnlichen Fahrzeugmodellen analysiert werden müssen um bereits zu diesem frühen Zeitpunkt detaillierte Erkenntnisse über die Problembereiche des Altfahrzeugrecyclings zu gewinnen. Darauf aufbauend werden unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungstendenzen konkrete Zielsetzungen und Anforderungen für das neu zu entwickelnde Fahrzeug, bzw. dessen Recyclingkonzept abgeleitet und als Ergebnis der Planungsphase verbindlich festgeschrieben.

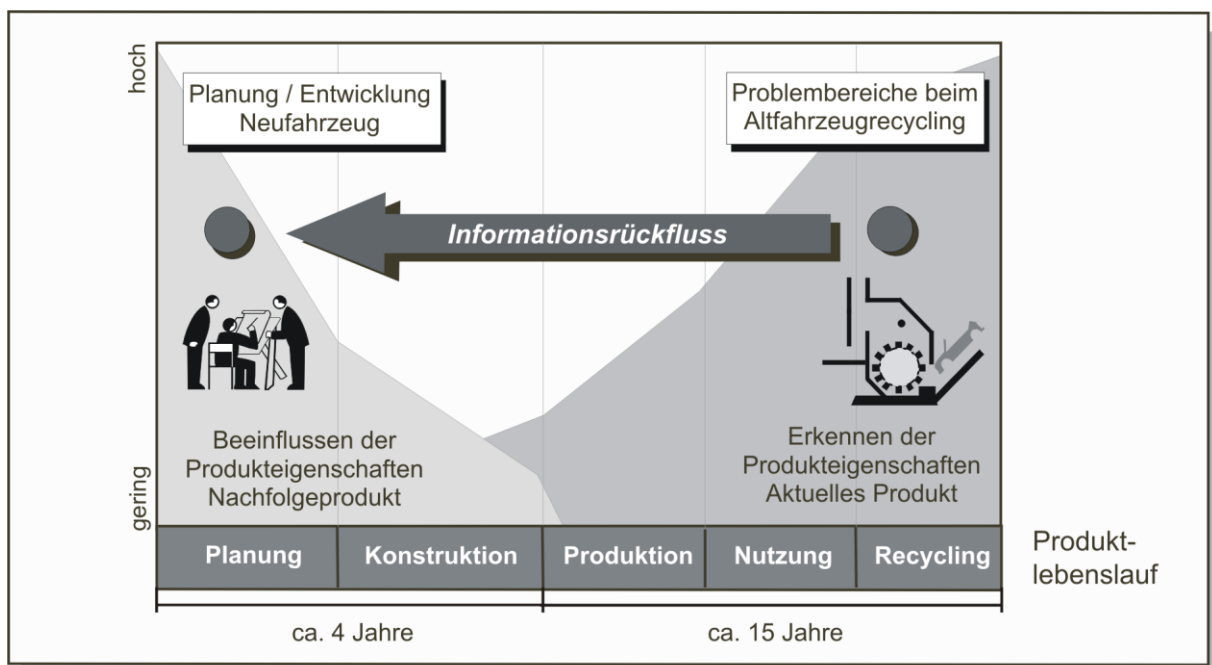


Abbildung 5.2: Rückfluss von Recyclinginformationen für die PKW-Entwicklung

Aufbauend auf diese Grundlage ist es möglich in den weiteren Konstruktionsphasen das fahrzeugspezifische Recyclingkonzept parallel zum Produkt und dessen

weiteren Konkretisierungsgrad zu entwickeln. Hierzu werden in der Technologiephase die einzelnen Konstruktionslösungen hinsichtlich den festgelegten recyclingbezogenen Zielsetzungen und Anforderungen aus der Planungsphase bewertet. Dies ist in dieser frühen Phase primär für die markanten Änderungspunkte des Fahrzeuges sinnvoll, da zu diesem Zeitpunkt lediglich für diese Umfänge erste quantifizierbare Daten hinsichtlich Werkstoffeinsatz, Gewicht und Produktstruktur vorhanden sind. Um dennoch eine Aussage über die Recyclingfähigkeit des Gesamtfahrzeuges treffen zu können, werden die restlichen Umfänge aus dem Vorgängermodell übernommen, angepasst und in das Gesamtfahrzeugkonzept integriert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die verschiedenen Fahrzeugmodule i.a. aus einem begrenzten Umfang aus Konstruktionselementen bestehen, die zumeist eine gewisse Ähnlichkeit zu den Vorgängermodulen aufweisen. Mit der Übertragung dieser Elemente auf das neu zu entwickelnde Produktkonzept ist es möglich bereits in der Technologiephase erste quantifizierbare Aussagen zur Erreichung der Zielsetzungen aus Recyclingsicht zu treffen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten und der gestalterischen Freiheitsgrade können diese Aussagen lediglich zu einer Grobplanung des Recyclingkonzeptes führen.

Im Rahmen der Fahrzeugphase lassen sich aufgrund der seriennahen Ausgestaltung der einzelnen Konzepte detailliertere Aussagen zur Demontage- und Recyclinggerechtigkeit des Fahrzeuges erstellen. Charakteristisch ist, dass die Anzahl der Freiheitsgrade gegenüber der Technologiephase wesentlich geringer werden. Die in der Technologiephase grob festgelegten Recyclingkonzepte können aufgrund der deutlich sichereren Datenlage über iterative Optimierungsschritte mit wesentlich höherer Aussagekraft präzisiert werden (Feinplanung). Zu diesem Zeitpunkt ist es sinnvoll zur Überprüfung der Ergebnisse detaillierte Demontageuntersuchungen anhand ausgewählter Prototypen durchzuführen.

Als Abschluss des Entwicklungsprojektes wird die Dokumentation des Recyclingkonzeptes für das Fahrzeug erstellt. Hierbei werden die Bauteile, die für eine stoffliche Verwertung und/oder Schadstoffentfrachtung aus dem Fahrzeug demontiert werden müssen in entsprechender Form belegt. Es muss beachtet werden, dass der Zugriff auf die erforderlichen Daten auch am Ende der Fahrzeuglebensdauer durch die Altfahrzeugverwertungs-Betriebe gewährleistet werden kann.

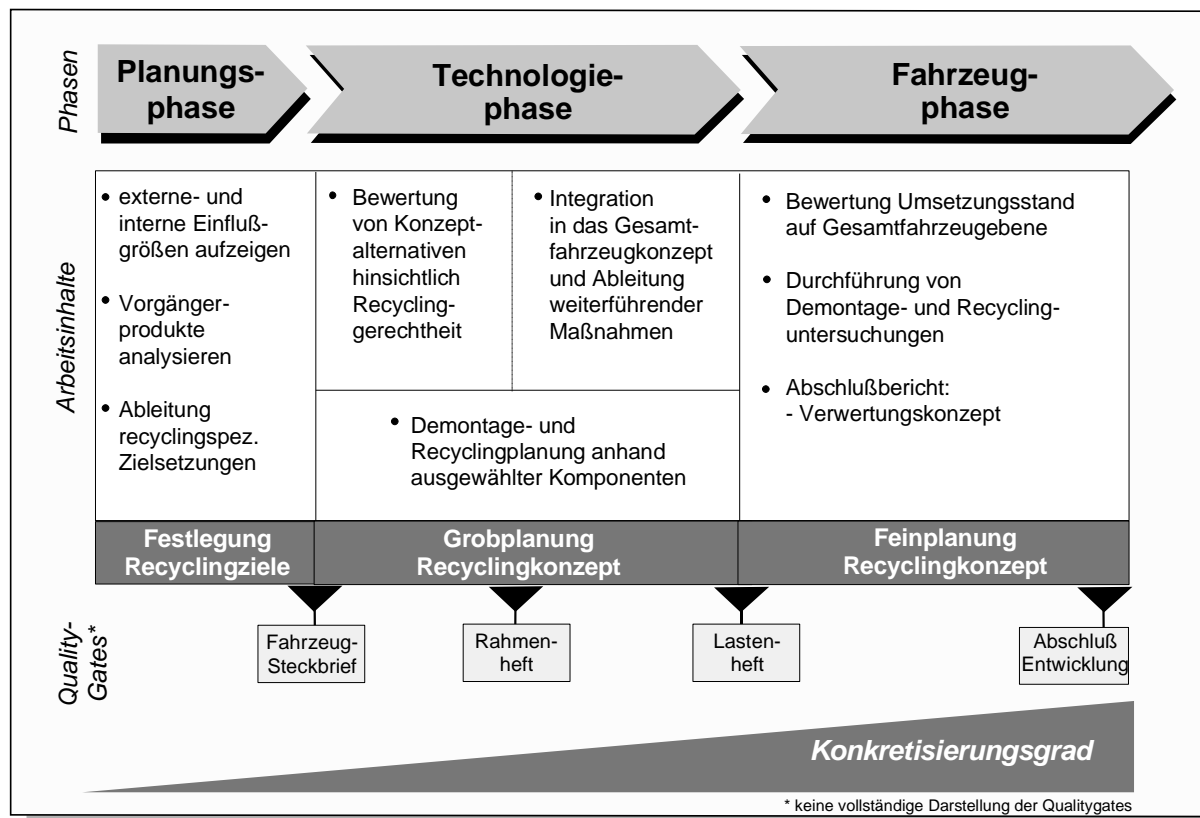


Abbildung 5.3: Aufgaben der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung /RUH 00/

Mit der beschriebenen Vorgehensweise ist es möglich, die Anforderungen an die recyclinggerechte Gestaltung des Fahrzeuges bereits frühzeitig einzubinden und somit die Planungsgenauigkeit und –sicherheit bei der Entwicklung des fahrzeugspezifischen Verwertungskonzeptes in den weiteren Entwicklungsphasen zu erhöhen. Dies trägt letztendlich dazu bei, dass am Lebensende des Fahrzeuges die Qualität und Umweltverträglichkeit des Recyclings erhöht und somit die recyclingbezogenen Zielsetzungen auch erreicht werden können. Die beschriebenen Aufgabenschwerpunkte werden in folgenden Kapiteln entsprechend dem Entwicklungsfortschritt präzisiert.

5.2.1 Produktplanung

Die Ermittlung der recyclingbezogenen Zielsetzungen und Anforderungen an das neu zu entwickelnde Produkt sowie deren Festschreibung am Ende der Planungsphase stellt das zentrale Element der recyclingintegrierten Produktentwicklung dar. Hierbei kommt der Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungstendenzen beim Fahrzeugrecycling eine wesentliche Bedeutung zu, da zwischen dem Recycling des Fahrzeuges und dessen Entwicklung eine erhebliche Zeitspanne liegt. Um diese

zukünftigen Entwicklungstendenzen bereits bei der Fahrzeugplanung berücksichtigen zu können, werden diese in Form so genannter Recyclingszenarien abgebildet /GAU 96, RIE 03/. Ein Recyclingszenario beschreibt dabei eine mögliche Verwertungssituation in der Zukunft, die durch die Ausprägung von verschiedenen Einflussfaktoren (Gesetze, Recyclingtechniken, etc.) beeinflusst wird. Auf Basis dieser Recyclingszenarien lassen sich dann konkrete Maßnahmen zur Verbesserung der Verwertungssituation ableiten. Die einzelnen Schritte zur Erstellung von Recyclingszenarien sind in Abbildung 5.4 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

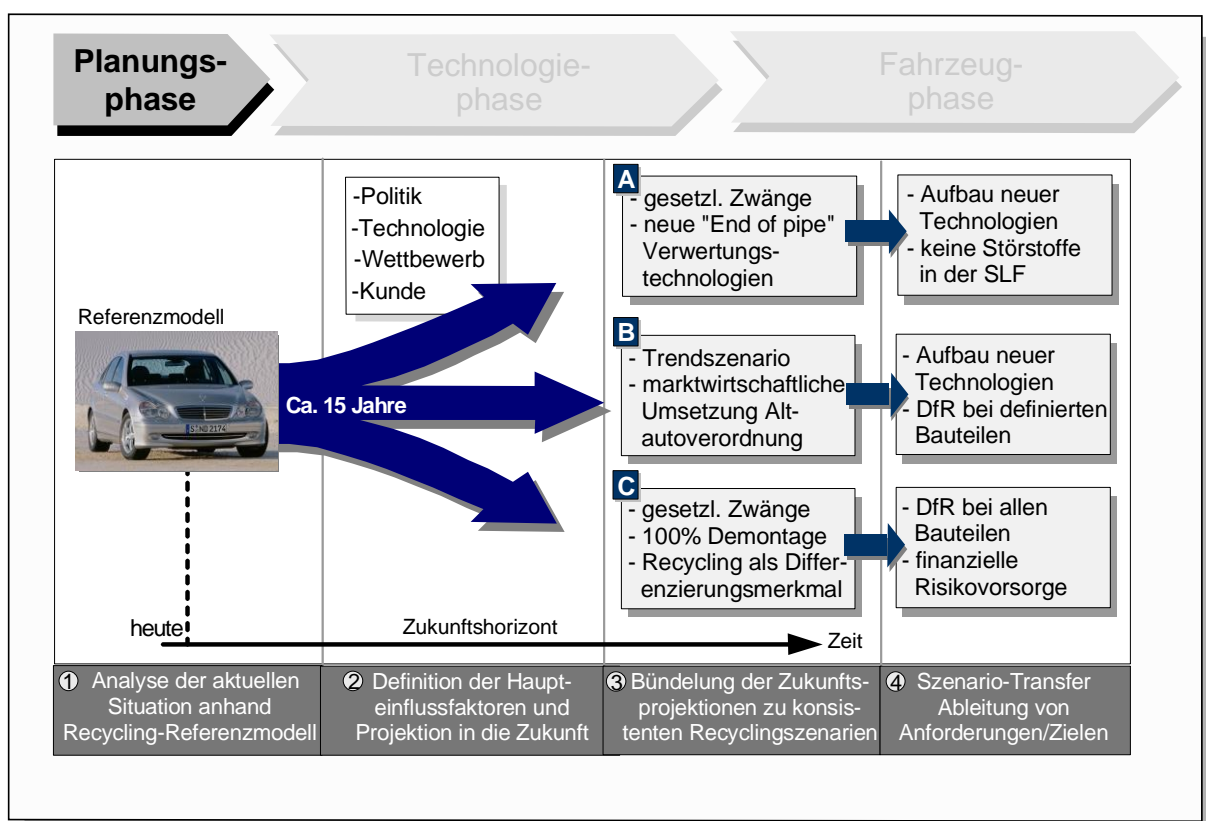


Abbildung 5.4: Vorgehensweise bei der Produktplanung

Die Grundlage für die Ableitung der Recyclingszenarien stellt die Analyse der aktuellen Situation bei der Altfahrzeugverwertung dar. Hierzu werden anhand von Referenzprodukten die derzeit zur Verfügung stehenden fahrzeugspezifischen Recyclingmöglichkeiten aufgezeigt und in entsprechender Form modelliert. Als Referenzprodukte können hierbei existierende Fahrzeuge (z.B. Vorgängermodelle) verwendet werden, die mit dem neu zu entwickelnden Produkt vergleichbar sind.

Die Vorgehensweise zur Erstellung des Recyclingreferenzmodells stellt sich wie folgt dar: Zunächst wird das Gesamtfahrzeug in seine funktionalen Module (z.B. Rohbau, Cockpit, Türen, Sitzanlage, usw.) sowie den darin enthaltenen Baugruppen, bzw. Bauteilen untergliedert und im Hinblick auf Materialeinsatz, potentielle Gefahrstoffe, Verbindungstechniken und Demontagemöglichkeiten analysiert. Diese Daten liegen erfahrungsgemäß nur zum Teil in dem geforderten Detaillierungsgrad vor, so dass deren Erfassung und Dokumentation einen erheblichen Anteil der Planungsphase in Anspruch nimmt. Aufbauend auf diese Strukturierung werden den einzelnen Elementen die derzeit unter wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Randbedingungen geeignetsten Recyclingverfahren zugeordnet (siehe Abbildung 5.5).

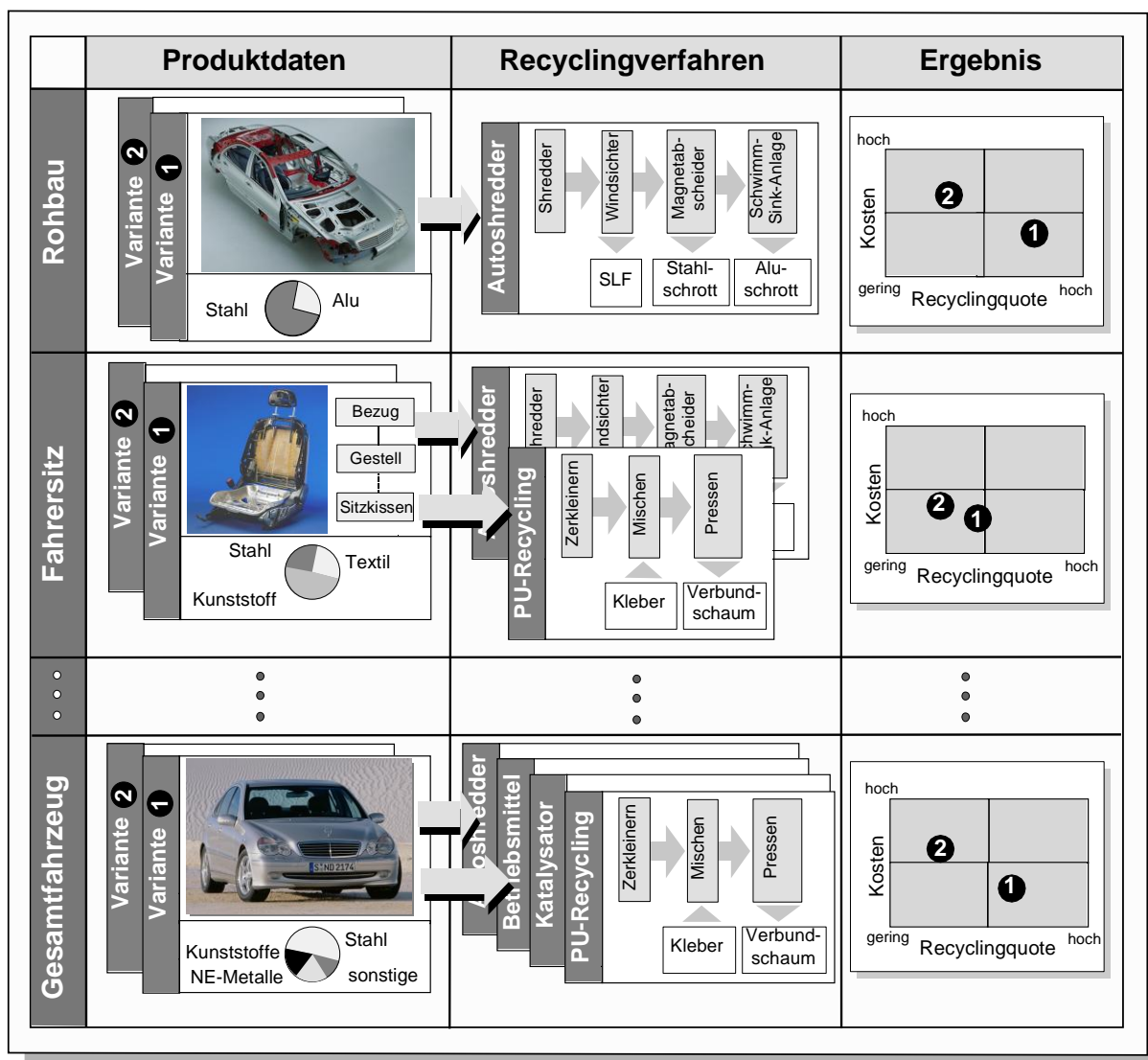


Abbildung 5.5: Aufbau des Recyclingreferenzmodell

Die Beschreibung der Recyclingverfahren erfolgt dabei auf Basis der einzelnen Prozessschritte, den entstehenden Materialfraktionen, sowie den Verfahrenskosten bzw. Materialerlösen. Als Ergebnis der Ist-Analyse lassen sich für die einzelnen Module, bzw. für das Gesamtfahrzeug die erreichbaren Recyclingquoten sowie die dabei entstehenden Gesamtkosten und -erlöse bestimmen (vgl. Kapitel 5.3.3).

Um bereits in dieser frühen Phase eine möglichst breite Datenbasis als Grundlage für die weitere Entwicklung zu schaffen, ist es sinnvoll mehrere Fahrzeuge mit unterschiedlichen Materialkonzepten bei der Auswahl des Recyclingreferenz Modells zu berücksichtigen. So können beispielsweise Fahrzeuge mit verschiedenen Rohbaumaterialkonzepten (Aluminium, Stahl oder Kunststoff) ausgewählt werden um bereits in dieser frühen Phase die Auswirkungen dieser Konzepte auf die Recyclingquoten und –kosten abschätzen zu können.

Aufbauend auf der Analyse der aktuellen Verwertungssituation werden im nächsten Schritt diejenigen Faktoren untersucht, die einen wesentlichen Einfluss auf den zukünftigen Ablauf des Altfahrzeugrecyclings haben. Das Ziel ist es für die einzelnen Faktoren mögliche Zukunftsprojektionen aufzuzeigen und zu beschreiben, um damit die Grundlage für die Ausgestaltung verschiedener Recyclingszenarien zu schaffen.

Die Schlüsselfaktoren bilden vor allem die gesetzlichen Vorschriften. Hierbei ist von wesentlicher Bedeutung wie sich die Gesetzgebung zur Altfahrzeugverwertung hinsichtlich Materialverbote, Pflichtdemontageumfänge, Begrenzung der energetischen Verwertung und Verpflichtung zur kostenlosen Rücknahme der Fahrzeuge durch den Hersteller entwickelt. Aber auch die allgemeine Abfallgesetzgebung, wie z.B. die TA Siedlungsabfall, nach der eine Deponierung der Shredderleichtfraktion ab 2005 nicht mehr zulässig ist, ist ein wesentlicher Faktor der die Ausgestaltung der zukünftigen Altfahrzeugverwertung maßgeblich beeinflusst. Als weitere wichtige Einflussgröße ist die Weiterentwicklung der Demontage- und Recyclingtechnik zu sehen. So sind Trends bei der Entwicklung und Optimierung von Recyclingtechnologien (Aufbereitung der Shredderleichtfraktion) ebenso in die Betrachtungen mit einzubeziehen wie die zukünftige Strukturierung der Altfahrzeugverwertungsbetriebe und deren technische Ausstattung. Eine Einschätzung der zukünftigen Wettbewerbssituation aus Recyclingsicht sowie die generellen unternehmensinternen Zielsetzungen aus Recyclingsicht runden das Bild der zukünftigen Situation bei der Altfahrzeugverwertung ab.

Ausgehend von der Analyse der relevanten Einflussgrößen und deren zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten lassen sich im nächsten Schritt verschiedene Recyclingszenarien bilden, in denen diese Zukunftsprojektionen gebündelt werden. Je nach Ausprägung der Einflussgrößen werden bei der Darstellung der zukünftigen Entwicklungen verschiedene Formen von Zukunftsprojektionen unterscheiden:

- ❑ In Extremprojektionen werden extreme, eher unwahrscheinliche Zukunftsentwicklungen dargestellt. Durch solche Zukunftsbilder soll in überzeichneter Form auf potentielle Entwicklungen aufmerksam gemacht werden, um Überraschungen zu vermeiden. Aus ihnen ergeben sich sog. Extremszenarien, die die möglichen zukünftigen Entwicklungen vollständig abbilden.
- ❑ Demgegenüber werden mit Trendprojektionen eher plausible Zukunftsbilder dargestellt. Es werden Entwicklungen gesucht, deren Eintreten als wahrscheinlich erachtet wird. Sie weisen daher einen stärkeren Gegenwartsbezug auf und sind dementsprechend mit einer gewissen Erwartungshaltung an die Zukunft verknüpft.

Abbildung 5.6 zeigt am Beispiel der gesetzlichen und technischen Einflussgrößen mögliche Zukunftsprojektionen sowie deren Bündelung zu konsistenten Recyclingszenarien auf. Recyclingszenario A beschreibt eine moderate Gesetzgebung, die im Wesentlichen auf der freiwilligen Selbstverpflichtung seitens der deutschen Automobilindustrie basiert. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass die Verfahren zur Aufbereitung, bzw. Verwertung der Shredderrestfraktion ausreichend verfügbar, anerkannt und auch wirtschaftlich darstellbar sind. Demgegenüber beschreibt Recyclingszenario C eine sehr viel restriktivere Gesetzgebung mit verbindlichen Vorgaben von stofflichen Verwertungsquoten, deren Erfüllung als Zulassungsvoraussetzung für das Fahrzeug gilt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass vor allem Recyclingtechnologien, die das Schließen von Materialkreisläufen ermöglichen, zum Einsatz kommen. Recyclingszenario B beschreibt das aus heutiger Sicht wahrscheinlichste Szenario (Trendprojektion). Es orientiert sich an den gesetzlichen Vorgaben gemäß der europäischen Altfahrzeugrichtlinie und geht von einer kontinuierlichen Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien aus, die sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch sinnvoll sind.




Szenarien Einfluß- faktoren				
		Szenario A	Szenario B	Szenario C
Politik	Recycling- quoten	• Recyclingquoten: -> 95% stoffl. und energ.	• Recyclingquoten: -> 85% stoffl. / 10% energ.	• Recyclingquoten: -> 95% stofflich
	Nachweis der Quoten	• Nachweis der Quoten über Gesamtstoffstrom aller Altfahrzeuge/Jahr	• Nachweis der Quoten wird Zulassungsvoraussetzung: ->rechnerischer Nachweis ->Strafsteuern bei Nicht- erfüllung	• Nachweis der Quoten über praktische Versuche; bei Nichterfüllung keine Zulassung
	Übernahme der Verwert- ungskosten	• Letzbesitzer trägt Verwertungsgebühr / Umsetzung der Altauto- verwertung nach markt- wirtschaftlichen Kriterien	• kostenlose Rücknahme der Altautos durch Hersteller (wesentlicher Anteil)	• Alle entstehenden Verwert- ungskosten sind vom Hersteller zu übernehmen
Technik	Recycling- technologien nach Shredder	• SLF-Verwertungs- möglichkeiten verfügbar, anerkannt und wirtschaftl. (energ., robst., stofflich) • NE-Metall- Aufbereitung nach Shredder optimiert (z.B. Alu-Colour-Sorting)	• SLF-Verwertung nur für Teil-Fractionen möglich; kostenintensive Auf- bereitungstechnik • Standard NE-Metall- Aufbereitung	• SLF-Aufbereitung nur im Pilotmaßstab; Verwertungs- wege nicht anerkannt • Standard NE-Metall- Aufbereitung
	Recycling- technologien vor Shredder	• nur wirtschaftliche Verfahren zum Einsatz; hoher Anteil Produkt- recycling	• Recyclingtechnologien für breites Anwendungsgebiet (Kunststoffmischfraktion); Kriterien: Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit	• Recyclingtechnologien für alle demontierbaren Komponenten; auch unwirtschaftl. Recycling- wege
	Struktur Altfahrzeug- verwerter	• Nur "Edelverwerter"	• "Edelverwerter" und "Materialverwerter"	• "Materialverwerter"
	...			

Abbildung 5.6: Entwicklung von Recyclingszenarien

Auf Basis der so erstellten Szenarien können im nächsten Schritt konkrete Maßnahmen zur Verbesserung der Recyclinggerechtigkeit des neu zu entwickelnden Produktes abgeleitet werden. Dazu werden zunächst die einzelnen Szenarien auf das Produkt projiziert, um somit die Folgen des Eintretens bestimmter Entwicklungen zu ermitteln (Szenario Transfer). Aus dieser Auswirkungsanalyse lassen sich dann die Chancen und Risiken für das Produkt bzw. dessen einzelnen Module ermitteln und Maßnahmen zur Verbesserung der Verwertungssituation identifizieren. Das Ergebnis kann in Form der Auswertungsmatrix dargestellt werden (Abbildung 5.7). In der Matrix werden als Spalten die Szenarien und als Zeilen die einzelnen Fahrzeugmodule verzeichnet. In den einzelnen Feldern der Auswertungsmatrix werden die Auswirkungen eines bestimmten Szenarios auf ein bestimmtes

Fahrzeugmodul, bzw. auf das Gesamtfahrzeug untersucht. Dabei wird jeweils die Frage gestellt <<Wie wirkt sich das Recycling-Szenario auf die Fahrzeugkomponente aus?>>. Die Beschreibung dieser Auswirkungen führt direkt zu den Chancen, die mit dem Eintreten dieses Szenarios für die Fahrzeugkomponente verbunden sind und den Risiken, die sich aus dem Eintreten des Szenarios ergeben.

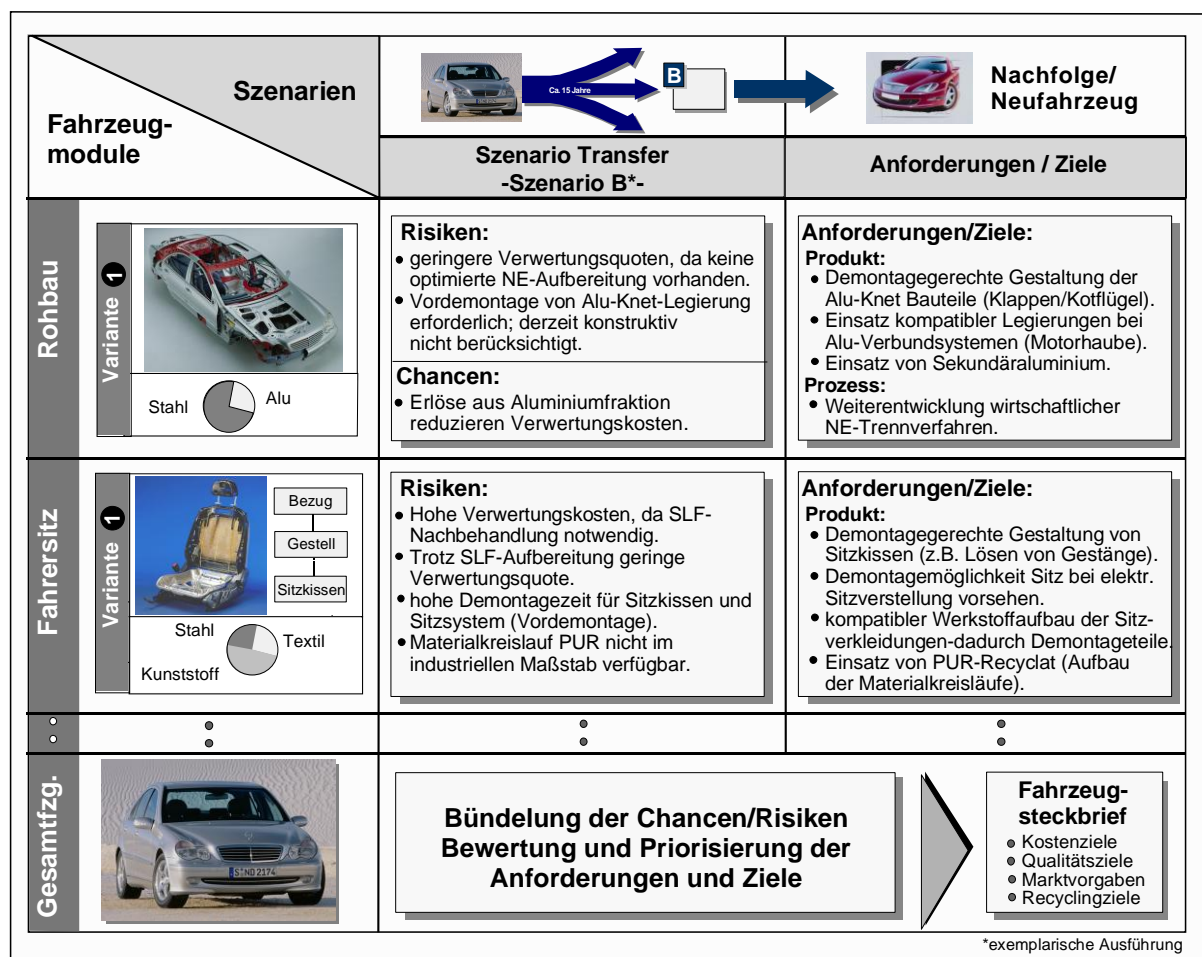


Abbildung 5.7: Szenario-Transfer am Beispiel Rohbau und Sitzanlage

Aus den beschriebenen Chancen und Risiken lassen sich dann Maßnahmen identifizieren, mit denen die Chancen bestmöglich genutzt und die Risiken reduziert oder umgangen werden können. Da sich nicht gleichzeitig alle Chancen nutzen und alle Risiken vermeiden lassen, müssen die einzelnen Maßnahmen bewertet, priorisiert und entsprechend gebündelt werden. Die sich daraus ergebenden Zielsetzungen und Anforderungen für das neu zu entwickelnde Produkt bzw. dessen Recyclingkonzept werden als Abschluss der Planungsphase im Fahrzeugsteckbrief festgeschrieben und legen die zu erreichenden recycling-spezifischen Eckdaten der neuen Produktgeneration fest.

5.2.2 Technologiephase

Ausgehend von den im Fahrzeugsteckbrief definierten Zielsetzungen und Anforderungen werden in der Technologiephase Lösungsmöglichkeiten für die einzelnen Module des Fahrzeuges erarbeitet und zur Serientauglichkeit entwickelt. In dieser Phase wird die spätere Recyclingeignung des Fahrzeuges entscheidend bestimmt. Die Aufgabe aus Recyclingsicht ist es, für die einzelnen Konstruktionslösungen mögliche Recyclingkonzepte zu ermitteln und hinsichtlich der geforderten Zielsetzungen und Anforderungen zu bewerten. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt hierbei auf der prinzipiellen Eignung der Recyclingverfahren hinsichtlich Materialverträglichkeit und/oder -trennbarkeit im Zusammenhang mit dem vorläufigen Produktaufbau. Neben der Optimierung von einzelnen Konstruktionslösungen müssen gleichzeitig die Auswirkungen der Module auf das Gesamtfahrzeugkonzept beachtet werden. Hierzu ist ein ständiger Abgleich zwischen den einzelnen Fahrzeug-Modulen erforderlich. Das Ergebnis der Technologiephase ist ein abgestimmter Produktentwurf, dessen zugeordnetes Recyclingkonzept am Produktlebensende mit vorhandenen Technologien umgesetzt werden kann.

Prinzipiell sind bei der Bewertung der Recyclinggerechtigkeit einzelner Konstruktionslösungen verschiedene Vorgehensweisen anzuwenden. Je nach Neuheitsgrad der Produktmerkmale ist zwischen Varianten-, Anpassungs- und Neukonstruktionen zu unterscheiden /EHR 03/.

Im Rahmen einer **Variantenkonstruktion** werden in der Regel das Werkstoffkonzept, die Produktgestalt sowie die Verbindungstechnik vom Vorgängermodell übernommen. Lediglich das Maßkonzept wird an veränderte Rahmenbedingungen angepasst. Beispiele dafür sind Getriebe, die für andere Leistungsanforderungen geändert werden oder Front-/Heckscheiben, bei denen im Vergleich zum Vorgänger-Typ nur die Abmessungen verändert werden. Im Extremfall werden sogar komplette Module ohne Änderungen von einem Vorgänger oder ähnlichen Fahrzeug übernommen wie z.B. die Nutzung einer gemeinsamen Plattform (Unterbau, Achse, etc.).

Bei diesen Fahrzeugmodulen ist es möglich, das Recyclingkonzept direkt aus dem Vorgängermodell zu übernehmen (siehe Abbildung 5.8). Hierzu sind im ersten Schritt die neuen Bauteildaten wie Größe und Gewicht im Produkt-Referenzmodell

anzupassen. Unter Berücksichtigung der sich daraus ergebenden neuen Mengenvolumina und ggf. veränderten Prozessparameter (z.B. Aufschlussgrad, Reinheitsgrad der erzeugten Fraktionen) können die Auswirkungen der Variantenkonstruktion auf das Recyclingkonzept aufgezeigt werden. Lassen sich mit dem festgelegten Verwertungskonzept die in der Planungsphase definierten Zielsetzungen und Anforderungen nicht realisieren, so ist eine Optimierung der zugeordneten Demontage- und Recyclingprozesse erforderlich. Eine Änderung des Produktentwurfes kann bei einer Variantenkonstruktion in der Regel nur für Einzelteile durchgeführt werden, die keine direkte Auswirkung auf die Gesamtfunktion des Produktes haben (z.B. Vergrößerung der Öl-Ablassschraube zur Reduzierung der Trockenlegungszeit).

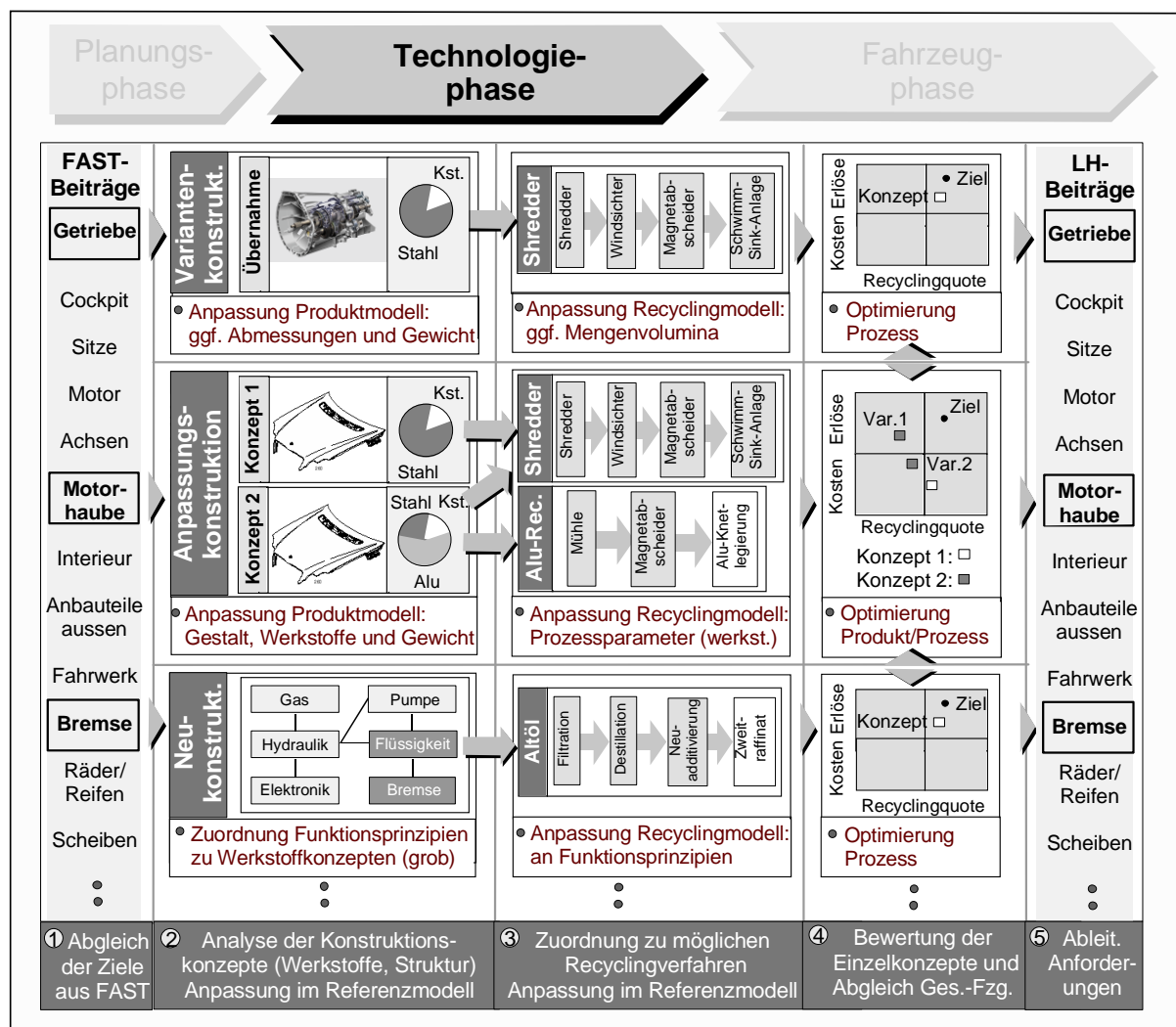


Abbildung 5.8. Aufgabenschwerpunkte der Technologiephase

Ist die prinzipielle Lösung (Konzept) des Fahrzeugmodules bekannt, aber ein neuer Entwurf und dessen Ausarbeitung aufgrund veränderter Rahmenbedingungen nötig, so wird diese Konstruktionsart als **Anpassungskonstruktion** bezeichnet. Dabei werden Gestalt, Werkstoffe und Abmessungen an neue Anforderungen angepasst, der Produktaufbau (Baustuktur) wird im Wesentlichen von bekannten Produkten übernommen. Als Beispiele hierfür lassen sich die Entwicklungen von alternativen Leichtbaukonzepten (Aluminium, Magnesium, Kunststoff) für Teile des Rohbaus, Klappen und Türen nennen, um Gewicht und Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges zu senken. Kennzeichnend bei einer Anpassungskonstruktion ist, dass mehrere alternative Entwürfe ausgearbeitet werden, aus denen dann die optimale Lösung ausgewählt wird.

Im Rahmen der Recyclingplanung sind diese Entwürfe hinsichtlich ihrer Recyclingeignung zu überprüfen, gemeinsam mit der Konstruktion Verbesserungspotenziale aufzuzeigen und ggf. neue recyclingfreundlichere Lösungskonzepte zu generieren. Hierzu wird die Materialauswahl der einzelnen Bauteilkonzepte im Referenzmodell angepasst und den derzeit möglichen Recyclingverfahren werkstoffspezifisch zugeordnet. Zwar sind die meisten Werkstoffkonzepte prinzipiell recyclingfähig, es ergeben sich jedoch oftmals mehrere Verfahrensalternativen, die sich hinsichtlich der Aufbereitungskosten, der Material- und Eigenschaftsverlusten, der entstehenden Abfallmengen usw. unterscheiden. So kann z.B. eine Aluminium-Motorhaube entweder durch Demontage und entsprechende Aufbereitung zu einer erneuten Alu-Knetlegierung verarbeitet werden oder aber über den Shredderprozess und nachgeschalteter Schwimm-Sink-Sortierung gemeinsam mit dem so genannten Alu-Gussschrott verwertet werden. Die für die Planung des Verwertungskonzeptes notwendigen Verfahrensdaten können hierbei prinzipiell aus dem Recycling-Referenzmodell übernommen werden. Es bedarf jedoch einer Anpassung der Prozessparameter an die jeweilige Werkstoffzusammensetzung des Produktes.

Ist für ein Bauteil/-Werkstoffkonzept kein Recyclingverfahren bekannt, so ist eine entsprechende Neuentwicklung erforderlich. Hierzu müssen innerhalb der Technologiephase zunächst Prinzipuntersuchungen anhand ähnlichen Produktaufbauten durchgeführt werden um geeignete Aufbereitungs- und Verwertungstechnologien auswählen zu können. Dabei können sich auch Auswirkungen auf angrenzende Bauteile ergeben. So ist beispielsweise durch die Änderung der Motorhaube von Stahl auf Aluminium die Demontage der Anbauteile (Kühlergrill,

Scharniere, etc.) erforderlich, da das dort eingesetzte Werkstoffkonzept nicht mit dem Alu-Recyclingverfahren kompatibel ist. Diese Auswirkungen sind bereits in der Technologiephase aufzuzeigen, um entsprechende Maßnahmen im Produktentwurf möglichst frühzeitig berücksichtigen zu können.

Nach der Ermittlung der optimalen Verfahren für die einzelnen Konzepte werden im nächsten Schritt die Bauteilvarianten gegenübergestellt und die aus Recyclingsicht geeignetste Lösung ausgewählt (vgl. Kapitel 5.3.3). Sind die definierten Ziele mit keinem Konzept zu erreichen, so ist eine Optimierung des Produktentwurfs und/oder der zugeordneten Recyclingverfahren erforderlich. Hierzu werden gemeinsam mit der Konstruktion neue Lösungsansätze entwickelt, indem sowohl die Werkstoffauswahl, Verbindungstechnik und Baustruktur des Produktes als auch die zugeordneten Recyclingverfahren und Verwertungswege gezielt variiert werden.

Bei einer **Neukonstruktion** existiert in der Regel kein Vorbild, auf das bei der Konstruktion zurückgegriffen werden kann. Die Aufgabe des Konstrukteurs ist es, ausgehend von einer abstrakten Problemstellung ein Produktkonzept zu entwickeln. Hierbei wird zunächst die gestellte Aufgabe in Teilaufgaben/-funktionen untergliedert für die anschließend prinzipielle Lösungsmöglichkeiten in Form physikalischer Effekte gefunden werden müssen. Eine wirkliche Neukonstruktion, für die es weder in der eigenen Branche noch bei einem anderen Unternehmen nicht wenigstens ein ähnliches Konzept gibt ist allerdings sehr selten. Als Beispiele bei der Fahrzeugentwicklung wäre der Airbag, neue Fahrsicherheitssysteme oder aber alternative Antriebssysteme wie die Brennstoffzelle zu nennen.

Da bei einer Neukonstruktion in diesen frühen Phasen lediglich eine Funktions- bzw. Wirkstruktur vorhanden ist, ist eine Beurteilung der Recyclinggerechtigkeit nur schwer möglich. Lediglich bei den Funktionsprinzipien, die eng mit einem bestimmten Werkstoffkonzept verbunden sind, lassen sich erste Abschätzungen durchführen. Die Hauptaufgabe aus Recyclingsicht besteht darin, für die einzelnen Funktionsprinzipien allgemeingültige recyclingbezogene Zielsetzungen und Anforderungen zu definieren. Handelt es sich z.B. um ein neues Fahrsicherheitssystem, so ist für das Teilsystem/-funktion „Flüssigkeit speichern“ auf eine entsprechende Trockenlegungsmöglichkeit zu achten. Mit diesen Vorgaben lassen sich die Konzepte allerdings noch nicht bewerten. Dies ist erst mit der Festlegung der vorläufigen Baustruktur und den jeweiligen Werkstoffkonzepten möglich. Ab diesem

Zeitpunkt ist die Vorgehensweise ähnlich der einer Anpassungskonstruktion. Da jedoch bei einer Neukonstruktion oftmals neuartige Werkstoffe und/oder Werkstoffkombinationen zum Einsatz kommen, ist es nicht immer möglich, auf die vorhandenen werkstoffspezifischen Recyclingkonzepte des Referenzmodells zurückzugreifen. Es bedarf der Neuentwicklung bzw. Modifikation von Recyclingverfahren (z.B. Brennstoffzelle). Diese müssen dann im Rahmen der weiteren Entwicklung parallel zum Produktfortschritt konzipiert und ggf. im Technikums-Maßstab erprobt werden.

Nach der Festlegung der Recyclingkonzepte für die einzelnen Konstruktionslösungen werden diese im nächsten Schritt zu einem Gesamtfahrzeug-Recyclingkonzept integriert. Hierbei können sich ggf. neue Auswirkungen bzw. Anforderungen für die einzelnen Fahrzeugmodule ergeben. Lassen sich die Gesamtfahrzeugziele (z.B. Verwertungsquote 95 Gew.%) aufgrund einer aus Recyclingsicht ungeeigneten Konstruktionslösung nicht erreichen, so kann die Optimierung anderer Fahrzeugmodule zur Zielerreichung notwendig werden. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen müssen zwischen den einzelnen Modulen abgeglichen werden, um daraus die optimale Kombination bestimmen zu können.

Als Abschluss der Technologiephase wird das vorläufige Verwertungskonzept für das Gesamtfahrzeug im Lastenheft festgelegt. Bei den Aufgabenschwerpunkten handelt es sich wie beschrieben um eine Grobplanung der Recyclingprozesse unter Berücksichtigung der vorläufigen Baustruktur und Werkstoffzusammensetzung des Produktes. Zu diesem Zeitpunkt wird festgelegt, ob ein Bauteil zur Zielerfüllung aus dem Fahrzeugverbund demontiert und separat behandelt werden muss, oder gemeinsam mit der Restkarosse über den Shredderprozess und die nachgeschalteten Verwertungsmöglichkeiten recycelt werden kann.

Eine detaillierte Analyse kann in diesem Stadium noch nicht vorgenommen werden, so dass z.B. die Prozessparameter der Recyclingverfahren sowie die Demontagereihenfolgen und –zeiten im Wesentlichen vom Referenzmodell übernommen werden müssen und lediglich anhand von Prinzipuntersuchungen abgesichert sind. Eine endgültige Festlegung der einzelnen Recyclingkonzepte erfolgt erst dann, wenn alle konstruktiven Details (z.B. Verbindungstechniken, etc.) ausgearbeitet sind.

5.2.3. Fahrzeugphase

In der Fahrzeugphase wird die endgültige Gestaltung des Produktes vorgenommen. Dazu gehört das Festlegen der Form, der Verbindungstechniken, der Oberflächenbeschaffenheiten, sowie der Werkstoffe für sämtliche Einzelteile des Fahrzeuges. Das Ergebnis der Fahrzeugphase ist die herstellungsspezifische Freigabe der Konstruktion für die Produktion. Sie stellt den Abschluss der Entwicklungsarbeiten dar.

Die Aufgabe aus Recyclingsicht ist es, ausgehend von den grob festgelegten Recyclingverfahren, eine Feinplanung des Verwertungskonzeptes durchzuführen. Der Schwerpunkt liegt darin, die Produktgestalt optimal an das jeweilige Recyclingverfahren anzupassen. Hierbei kann sowohl eine Korrektur bzw. ein Überarbeiten der einzelnen Produktentwürfe als auch der zugeordneten Recyclingverfahren erforderlich werden.

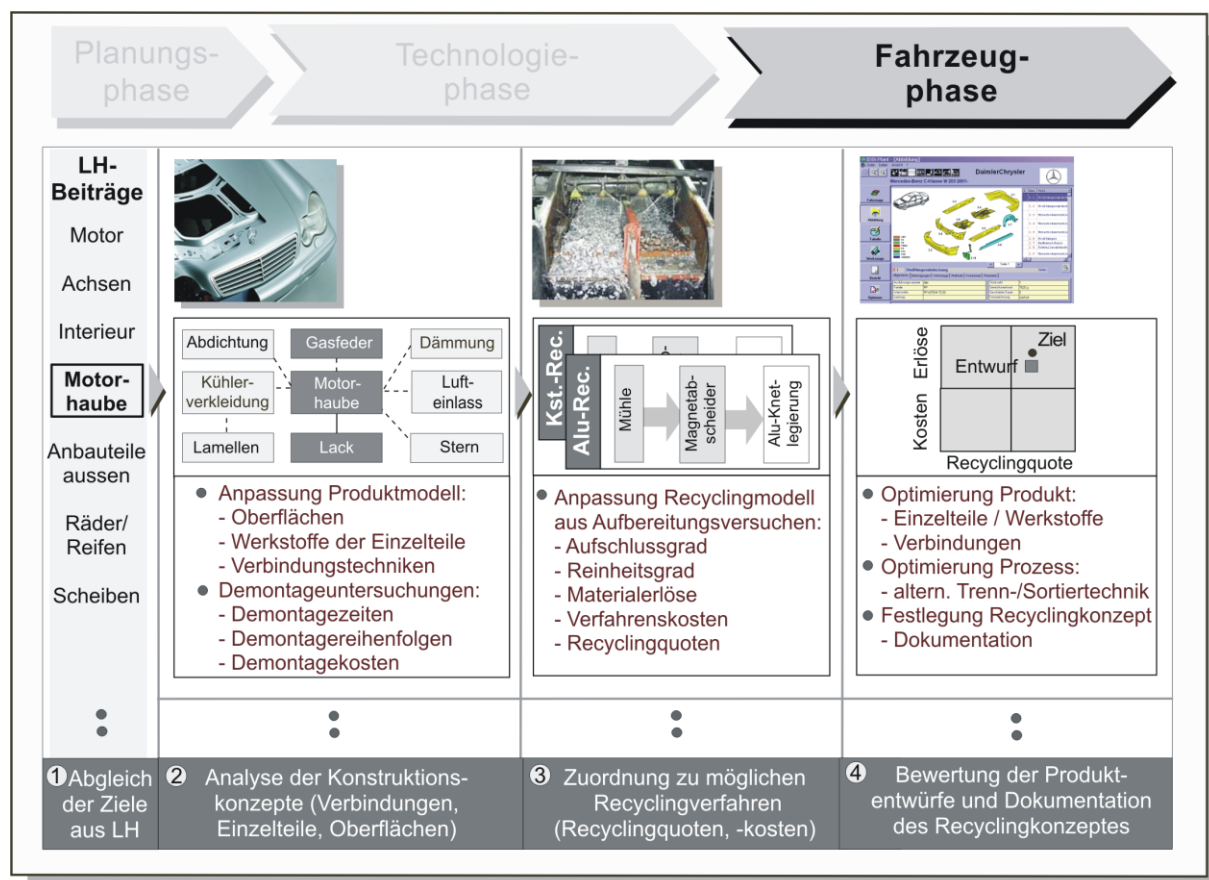


Abbildung 5.9: Aufgabenschwerpunkte der Fahrzeugphase

Bei der Feinplanung der Produkte spielt vor allem die Auswahl der Verbindungstechniken eine wesentliche Rolle. Sie bestimmen maßgeblich den Aufwand für die Durchführung von Demontageoperationen, die als Ausgangspunkt des Recyclings den größten Einfluss auf die Entsorgungskosten haben. Sehr wichtig hierbei ist es, keine allgemeingültigen Aussagen zur Recyclinggerechtigkeit bestimmter Verbindungselemente zu treffen, ohne die jeweiligen Randbedingungen der Demontage- und Verwertungssituation zu kennen. So kann beispielsweise eine stoffschlüssige Verbindung (z.B. Kleben, Schweißen) mit Hilfe zerstörender Demontageverrichtungen (Abreißen, ..) durchaus einfacher zu lösen sein als eine Schraub- oder Steckverbindung, die sehr schlecht zugänglich ist oder sich nur mit Spezialwerkzeugen lösen lässt. Oftmals müssen sogar Verbindungselemente überhaupt nicht gelöst werden, da die Werkstoffkombinationen mit Hilfe verfahrenstechnischer Schritte viel einfacher aufgeschlossen und separiert werden können (z.B. Stahlnieten bei Kunststoffbauteilen).

Dies gilt auch bei der Festlegung der Werkstoffe für die noch auszugestaltenden Einzelteile des Produktes. Um den Aufwand für die Materialtrennung zu minimieren, ist bei der Festlegung der Werkstoffe auf die Verträglichkeit der im Aufbereitungsprozess entstehenden Materialfraktionen zu achten. Vor allem für die Verwertung von Kunststoffen ist die gute Verträglichkeit der kombinierten Werkstoffe sehr wichtig, damit die entstehenden Materialfraktionen zu hochwertigen Sekundärwerkstoffen verarbeitet werden können. Lässt sich dies nicht realisieren, so sind die entsprechenden Einzelteile zumindest demontagegerecht anzuordnen, dass sie mit einem separaten Recyclingverfahren aufbereitet werden können.

Um eine flächendeckende Kreislaufwirtschaft zu realisieren, ist bei der Werkstoffauswahl auch auf einen möglichst hohen Einsatz von Recyclaten zu achten. Vor allem bei Kunststoffbauteilen ist der Einsatz von Recyclaten auszubauen. Die Anwendungsfelder sind vor allem Bauteile im nicht sichtbaren Bereich, wo Oberflächenbeschaffenheiten und optische Qualität von untergeordneter Bedeutung sind (z.B. Radlaufverkleidungen). Bei hochwertigen Kunststoffen lässt sich sogar eine Einsparung von Materialkosten durch den Einsatz von Recyclaten realisieren.

Neben den Verbindungstechniken und der Werkstoffwahl der noch auszugestaltenden Einzelteile sind auch die Oberflächenbeschaffenheiten der Bauteile an das jeweilige Recyclingkonzept anzupassen. Insbesondere bei der stofflichen

Verwertung von Kunststoffen stellen häufig lackierte Bauteile einen erheblichen Problemfaktor dar, da die Recyclateigenschaften von Kunststoffen bereits bei geringen Lackrückständen negativ beeinflusst werden. Um dies zu verhindern, sind je nach Anwendungsfall entweder neue, mit dem Polymer verträgliche Lacksysteme einzusetzen, oder aber die Lackschichten beim Recyclingprozess mit Hilfe entsprechender Aufbereitungstechnik (Schmelzefiltration) von den Polymeren zu trennen.

Wie die einzelnen Beispiele zeigen, müssen bei der Feinplanung der Produkte die späteren Demontage- und Verwertungsprozessketten so detailliert wie möglich in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Zur Überprüfung der bislang nur grob festgelegten Verwertungskonzepte ist es daher sinnvoll, zu diesem Zeitpunkt detaillierte Demontage- und Recyclinguntersuchungen anhand ausgewählter Prototypen durchzuführen. Erst danach können präzise Aussagen zur Demontage- und Recyclingeignung des Produkts getroffen werden. Dies gilt insbesondere für Neukonstruktionen, da dort oftmals noch keine funktionierenden Recyclingkreisläufe existieren. Im Rahmen der Demontageuntersuchungen sind für die relevanten Fahrzeugumfänge die produktspezifischen Demontagezeiten und –reihenfolgen zu ermitteln. Des Weiteren sind die Einbaulagen der Bauteile, die Zugänglichkeiten und vorhandenen Angriffsflächen für die Werkzeuge sowie die möglichen Auswirkungen von Gebrauchseinflüssen zu prüfen. Zur Quantifizierung der Recyclingergebnisse sind darüber hinaus die produktspezifischen Recyclingprozessketten, die Verfahrenskosten und Materialerlöse sowie die erreichbaren Recyclingquoten zu ermitteln. Dieses Wissen ist in entsprechender Form zu dokumentieren und ständig zu aktualisieren.

Ausgehend von den ermittelten Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes kann das endgültige Verwertungskonzept für das Gesamtfahrzeug festgelegt werden. Dieses ist als Abschluss der Fahrzeugphase in entsprechender Form zu dokumentieren. Hierzu werden alle Maßnahmen, die zur Erreichung der jeweiligen Recyclingziele erforderlich sind, beschrieben (vgl. Kapitel 6.3). Sie stellen die Basis für die Optimierung der umweltverträglichen Behandlung von Altfahrzeugen dar und sind somit ein elementarer Baustein zum Aufbau und zur Optimierung von Stoffkreisläufen.

5.3 Rechnergestützter Recycling Problemlösezyklus

Das zentrale Element innerhalb der einzelnen Phasen des beschriebenen Vorgehensmodelles ist die Analyse und Bewertung der Produktkonstruktionen im Hinblick auf deren Demontage- und Recyclinggerechtigkeit sowie das Ableiten von Maßnahmen zur Produkt- bzw. Prozessverbesserung. Formal kann dies als Durchlaufen eines Recycling Problemlösezyklusses dargestellt werden, der durch iteratives Vorgehen zum optimalen Ergebnis führt. Er stellt im Rahmen des Gesamtkonzeptes eine Art Mikro-Logik dar, die in jeder Projektphase angewandt wird. Der Stand der Entwicklungs- und Realisierungsarbeiten in den einzelnen Phasen hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf den Inhalt und den Detaillierungsgrad des Problemlösezyklusses.

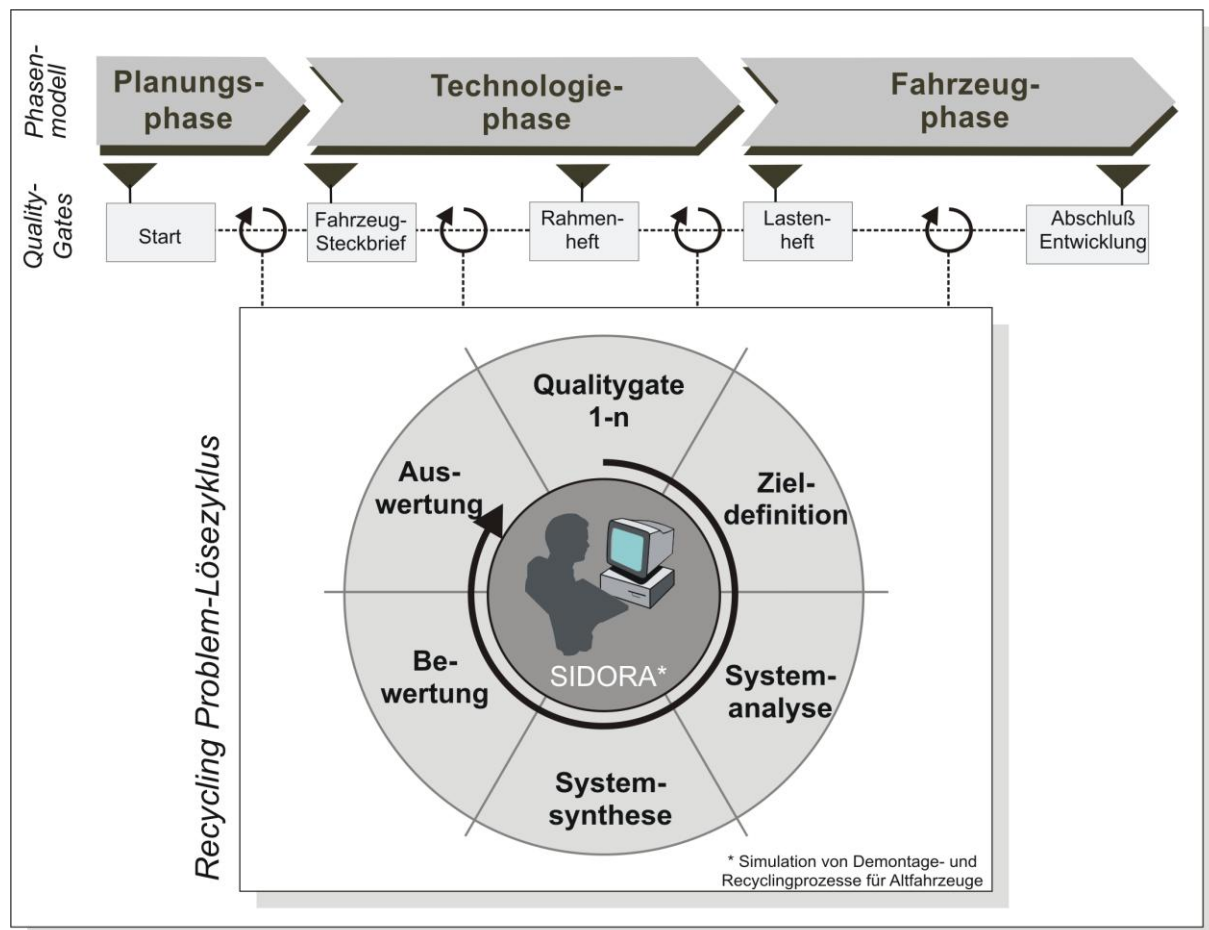


Abbildung 5.10: Bausteine des Recycling Problemlösezyklusses

Erster Schritt des Recycling Problemlösezyklusses ist die Zieldefinition. Er dient zur Informationsbeschaffung über die recyclingspezifischen Anforderungen und Ziele,

die an das Produkt im Einzelnen gestellt werden. Die Systemanalyse umfasst die Sammlung aller Produkt-, Demontage- und Recyclingdaten, die zur Bewertung des Produktes hinsichtlich der festgelegten Ziele notwendig sind. Sie ist im Wesentlichen eine Bestandsaufnahme mit Bezug auf das zu untersuchende Produktsystem. Aufbauend auf der Systemanalyse werden im Rahmen der Systemsynthese verschiedene Demontage- und Recyclingmöglichkeiten für das Produkt ermittelt und quantifiziert. Dazu werden zunächst alle technisch möglichen Demontagezustände des Produktes abgebildet. Darauf aufbauend werden den einzelnen Demontagegruppen die entsprechenden Recyclingprozesse zugeordnet. Als Ergebnis ergibt sich eine Vielzahl an Verwertungsmöglichkeiten für das Produktsystem. Aus diesen Lösungsmöglichkeiten wird bei der Bewertung diejenige Kombination ermittelt, welche die festgelegten Zielsetzungen am besten erfüllt. Als Abschluss des Problemlösezyklusses werden im Rahmen der Auswertung die recyclingbezogenen Schwachstellen des Produktes ermittelt sowie Optimierungspotentiale für das Produkt- bzw. Recyclingkonzept aufgezeigt. Die wechselseitige Beziehung dieser Phasen besteht auf zwei Ebenen. Auf der einen Ebene ergibt sich eine chronologische Abhängigkeit, in dem auf die Klärung der Aufgabe die Systemanalyse und -synthese folgt, ehe der Prozess mit der Bewertung und Auswertung abgeschlossen wird. Auf der anderen Ebene ist der Problemlösezyklus als iterativer Prozess anzusehen. Nachdem die einzelnen Phasen ein erstes Mal durchlaufen wurden, ist zu prüfen, ob eine Anpassung der gesetzten Rahmenbedingungen (Ziele, Recyclingverfahren, etc.) erforderlich ist.

Die Komplexität der Bearbeitungsaufgabe sowie der Umfang des erforderlichen Wissens lassen den Einsatz rechnergestützter Verfahren zur Unterstützung des Recycling Problemlösezyklusses sinnvoll erscheinen. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit das Planungsinstrument SIDORA (Simulation von Demontage- und Recyclingprozessen für Altfahrzeuge) entwickelt, in dem alle relevanten Einflussgrößen erfasst und abgebildet werden. Die Zielsetzung ist es, den Anwender bei der Problemlösung, insbesondere bei der Durchführung der einzelnen Schritte im Sinne einer recyclinggerechten Produktgestaltung zu unterstützen. Durch die enge Verknüpfung der einzelnen Schritte des Problemlösezyklusses mit dem Planungsinstrument wird sowohl ein einheitlicher Ablauf der Demontage- und Recyclingplanung als auch eine systematische Erfassung und Dokumentation der relevanten Daten zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung sichergestellt.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Schritte des Problemlösezyklusses präzisiert sowie die Grundstrukturen und notwendigen Funktionalitäten des Planungsinstrumentes erläutert.

5.3.1 Zieldefinition und Präzisierung der Aufgabenstellung

Die Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung stellt den ersten Schritt des Recycling Problemlösezyklusses dar. Sie beinhaltet die Auswahl und Beschreibung des zu untersuchenden Produktsystems, die Festlegung des Untersuchungsrahmens sowie die Zieldefinition.

Die Beschreibung des Produktsystems umfasst die Auswahl des Fahrzeugtyps sowie die Festlegung der jeweiligen Ausstattungsumfänge. Dabei empfiehlt es sich, die Fahrzeugvariante auszuwählen, welche den höchsten Schwierigkeitsgrad aus Recyclingsicht darstellt (z.B. maximale Ausstattung, minimale Motorisierung). Der Untersuchungsrahmen legt die Auswahl an möglichen Recyclingverfahren fest und definiert die dazugehörigen Systemgrenzen (vgl. Kapitel 5.4.3). Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt darin, die recyclingspezifischen Ziele und Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden, klar herauszuarbeiten. Dabei ergibt sich je nach Entwicklungsphase ein unterschiedlicher Konkretisierungsgrad. Zu Beginn der Planungsphase werden die Gesamtfahrzeugziele aus Recyclingsicht ermittelt. Sie werden vor allem aus den unternehmensinternen und -externen Vorgaben (Gesetze, Kunden, etc.) sowie möglichen zukünftigen Entwicklungstendenzen abgeleitet (vgl. Kapitel 5.2.1). Aus diesen Zielen werden im Verlauf der Planungsphase durch ein oder mehrmaliges Durchlaufen des Problemlösezyklusses Optimierungspotentiale für die einzelnen Fahrzeugmodule erarbeitet. Diese stellen wiederum den Ausgangspunkt für die Technologiephase dar. In der Technologiephase erfolgt dann die Bewertung der einzelnen Konstruktionslösungen sowie der Abgleich der Ergebnisse mit den Gesamtfahrzeugzielen. Daraus lassen sich die Anforderungen für die einzelnen Bauteile bestimmen und als Vorgabe für die Fahrzeugphase festschreiben.

Durch dieses iterative Vorgehen ist es möglich, die einzelnen Ziele entsprechend dem Entwicklungsfortschritt zu präzisieren. Dabei kann es auch notwendig sein, den Untersuchungsrahmen oder die Ziele während der Durchführung durch zusätzlich gesammelte Informationen zu modifizieren.

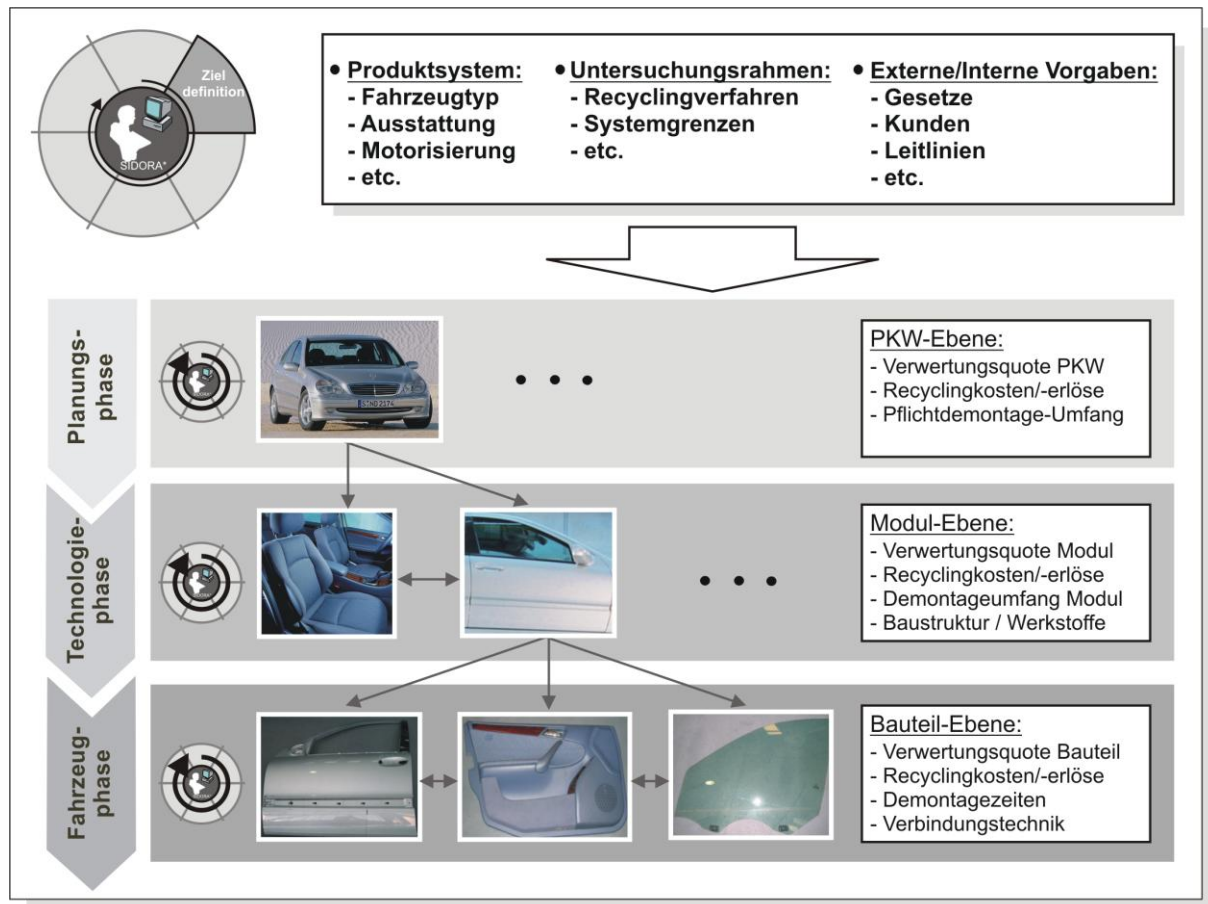


Abbildung 5.11: Detaillierung der Ziele entlang des Entwicklungsprozesses

Bei der Definition der Zielsetzungen kann prinzipiell zwischen Festforderungen und Mindestforderungen unterschieden werden. Festforderungen müssen unter allen Umständen erfüllt werden. Ohne deren Erfüllung ist die vorgesehene Lösung auf keinen Fall akzeptabel (z.B. Demontagepflichtumfänge entsprechend Anhang 1 der Altfahrzeugrichtlinie sicherstellen, Recyclingquote größer 95%). Mindestforderungen sind Forderungen mit Toleranzbereich. Sie können mehr oder weniger gut erfüllt werden, evtl. kann ein begrenzter Mehraufwand zur Erfüllung akzeptiert werden (z.B. einfache und schnelle Demontage sicherstellen etc.). Diese Gliederung der Anforderungen ist für die spätere Bewertung der Lösungsvorschläge und -varianten von großer Bedeutung, da sich hieraus die eigentlichen Kenngrößen für den Nutzen der Konstruktion ergeben. Der Grad der Erfüllung der gestellten Anforderungen ist die Grundlage für die Auswahl der besten Variante. Um eine eindeutige Aussage bei der Bewertung treffen zu können, sind die Anforderungen und Ziele durch quantitative Zahlenangaben zu präzisieren und als verbindliche Ausgangsposition für die weiteren Entwicklungsaktivitäten in Form einer Anforderungsliste (z.B. Fahrzeugsteckbrief, Rahmen- oder Lastenheft) zu dokumentieren.

5.3.2. Systemanalyse

Die Zielsetzung der im Rahmen des Recycling Problemlösezyklus durchzuführenden Systemanalyse ist die Ermittlung der entsprechenden Produkt-Demontage- und Recyclingdaten. Diese Daten stellen die Informationsbasis für die weiteren Schritte des Problemlösezyklusses dar und legen somit weitgehend den Eingriffs- und Gestaltungsbereich für die Lösungsmöglichkeiten fest.

Die Voraussetzung ist eine effiziente Unterstützung des Anwenders durch eine einheitliche Strukturierung und konsistente Abbildung des Systems Altfahrzeugrecycling in einem Datenmodell. Unter Berücksichtigung der Vorgehensweise beim Altfahrzeugrecycling sowie den Grundlagen der Produktdaten-Modellierung bei Fahrzeugentwicklungsprojekten ergeben sich die in Abbildung 5.12 dargestellten Bestandteile des Demontage- und Recycling-Planungsinstrumentes. Im Folgenden wird zur Erläuterung der Aktivitäten innerhalb der Systemanalyse der Aufbau des Planungsinstrumentes kurz beschrieben, die rechner spezifische Umsetzung wird in Kapitel 5.4 präzisiert.

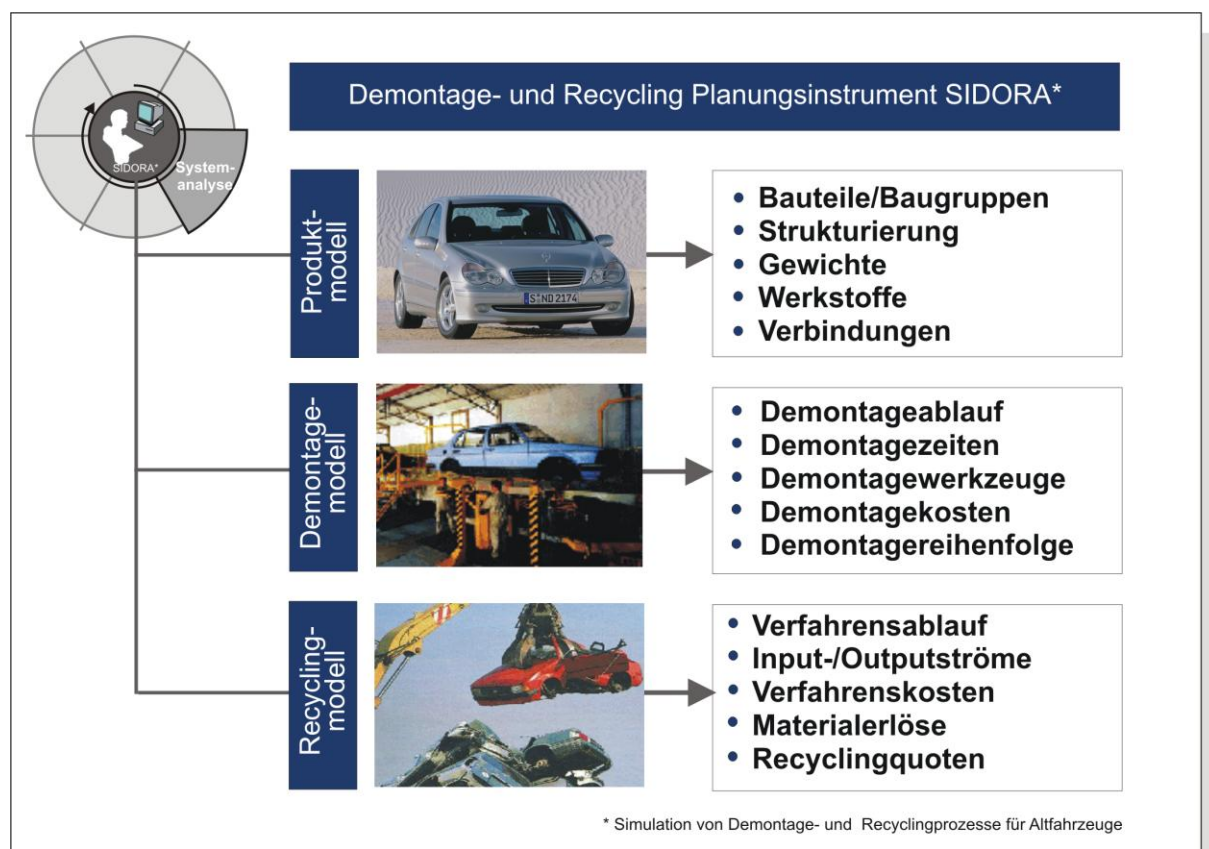


Abbildung 5.12: Bausteine des Planungsinstrumentes SIDORA

Das Produktmodell beschreibt die Zusammensetzung des Fahrzeuges. Es enthält alle relevanten Informationen bezüglich Baugruppen, Bauteilen, Werkstoffen, Gewichten sowie deren Strukturierung. Diese bauteilbeschreibenden Daten werden von den jeweiligen Entwicklungsingenieuren festgelegt und bilden die grundlegende Architektur des Planungsinstrumentes.

Im Demontagemodell werden die Informationen abgebildet, die zur vollständigen Beschreibung der einzelnen Demontageprozesse notwendig sind. Dazu gehören neben den Demontagezeiten und -werkzeugen, die zum Lösen der Verbindungselemente notwendig sind, auch die Demontagereihenfolgen und -kosten. Diese Daten stellen den Ausgangspunkt für die Ermittlung der unterschiedlichen Demontagezustände des Produktes dar. Da sich die Demontagemöglichkeiten direkt aus dem Produktverbund ergeben, besteht eine enge Verknüpfung dieser beiden Modelle.

Im Recyclingmodell werden die beim Altfahrzeugrecycling anwendbaren Recyclingprozesse als Input-Outputflüsse abgebildet. Die Grundlage hierzu bilden die Ausführungen der Kapitel 2 und 3, in denen die allgemeinen Prozessketten des Recyclings sowie der Ablauf des Altfahrzeugrecyclings aufgezeigt wurden. Neben den Prozessketten werden auch Verfahrenskosten und Materialerlöse der erzeugten Fraktionen im Recyclingmodell berücksichtigt. Ausgehend von diesen Analysen können prinzipiell drei Kategorien von Recyclingverfahren definiert werden, mit denen die in dem Fahrzeug enthaltenen Baugruppen, Bauteile bzw. Werkstoffe recycelt werden können (siehe Abbildung 5.13):

A: Produktrecycling: Demontage und separate Aufarbeitung

B: Materialrecycling produktbezogen: Demontage und separate Aufbereitung

C: Materialrecycling Restfahrzeug: Shredderprozess

Je nach Entwicklungsphase ergibt sich bei der Ermittlung der Daten ein unterschiedlicher Aufwand und Detaillierungsgrad. Die Planungsphase ist gekennzeichnet durch einen hohen Informationsbedarf, da sowohl auf Seiten des Produktes (Vorgänger, Bench) als auch auf Seiten der möglichen Demontage- und Recyclingdaten noch keinerlei strukturierte Informationen vorliegen. Dies gilt insbesondere bei der Erstaufnahme der Daten. In der Konzeptphase werden wie beschrieben lediglich große Änderungsumfänge analysiert. Der Schwerpunkt der

Betrachtungen liegt bei der Ermittlung alternativer bzw. neuartiger Recyclingprozesse für neue Bauteil-/Werkstoffkonzepte. Die Vielzahl der Daten kann dabei aus dem erstellten Referenzmodell übernommen und angepasst werden. In der Fahrzeugphase müssen die bislang nur grob vorhandenen Daten anhand detaillierter Demontage- und Recyclinguntersuchungen präzisiert werden. Diese Untersuchungen werden jedoch nur für ausgewählte Fahrzeugmodule durchgeführt.

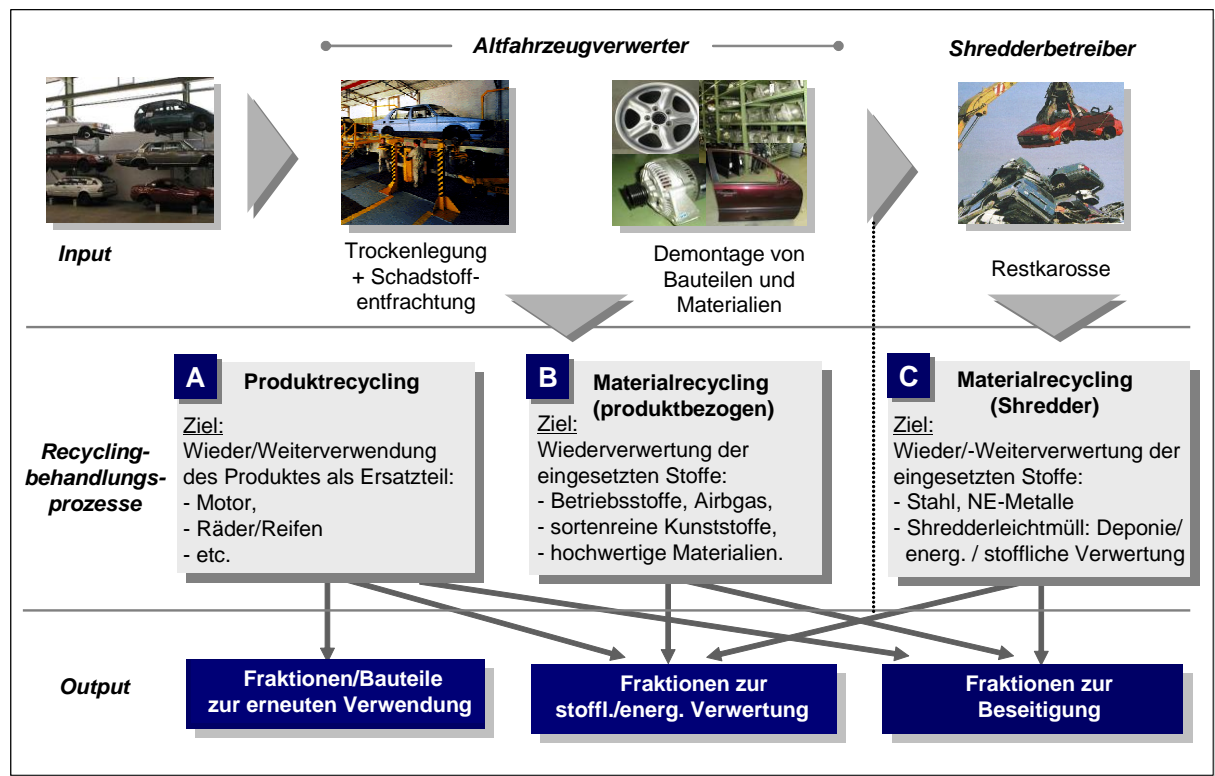


Abbildung 5.13: Strukturierung des Recyclingmodells

5.3.3 Systemsynthese

Die Zielsetzung der Systemsynthese ist es, aufbauend auf der Systemanalyse und der Zielformulierung die verschiedenen Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes zu ermitteln, zu quantifizieren sowie deren prinzipielle Tauglichkeit zu prüfen, und damit die Grundlage für die Bewertung und Entscheidung zu liefern.

Bei der Zuordnung der Bauteile des Fahrzeuges zu den möglichen Recyclingprozessen gibt es eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten. Beispielsweise können Kunststoffbauteile sowohl mit einem entsprechenden materialbezogenen Aufbereitungsverfahren als auch durch den Shredderprozess mit nachgeschalteter Aufbereitung der Shredderleichtfraktion recycelt werden. Die Auswahl der optimalen

Verwertungsoption hängt dabei von den jeweiligen Kosten und Erlösen, den Qualitäten der erzielbaren Fraktionen sowie den entstehenden Abfallmengen ab.

Abbildung 5.14 zeigt das Vorgehen bei der Systemsynthese. Für die Bestimmung der optimalen Verwertungsoption müssen zunächst alle technisch möglichen Kombinationen von Demontageprozessen und somit alle technisch möglichen Demontagezustände des Produktes ermittelt werden. Darauf aufbauend können den einzelnen Bauteilfraktionen die jeweils geeigneten Recyclingverfahren zugeordnet werden. Das Ergebnis ist die Beschreibung aller technisch möglichen Demontage- und Recyclingzustände des Produktes hinsichtlich Recyclingquoten und Kosten/Erlösen. Die Abbildung dieser Zuordnungen erfolgt durch Verknüpfung des Produkt-, Demontage- und Recyclingmodells und wird im Folgenden als „Simulation von Demontage- und Recyclingszenarien“ bezeichnet.

Der Ausgangspunkt für die Abbildung der möglichen Zuordnungen ist der Produktverbund des Fahrzeuges und der darin enthaltenen abgrenzbaren Module wie z.B. Türen, Cockpit, Sitze etc. Durch die Ausführung einer Kombination von Demontageprozessen (Lösen eines Verbindungselementes) wird dieser Produktverbund in eine definierte Menge an Bauteilen bzw. Baugruppen, so genannten Demontagegruppen, überführt. Eine Demontagegruppe kann je nach gewählter Kombination von Demontageprozessen aus einem Bauteil, aus einem noch bestehenden Teilverbund aus Bauteilen oder aber aus dem gesamten Produktverbund bestehen. So ist in Abbildung 5.14 ersichtlich, dass das Produkt Motorhaube entweder durch Lösen der Verbindung 1 in die Demontagegruppen DG1 und DG2, oder durch Lösen der Verbindung 7 in die Demontagegruppen DG1 und DG3 überführt werden kann. Die aus einer definierten Kombination von Demontageprozessen entstehenden Demontagegruppen werden als Demontagezustand des Produktes bezeichnet.

Nach der Generierung aller technisch realisierbaren Demontagezustände des Produktes werden den jeweiligen Demontagegruppen eines Demontagezustandes die entsprechenden Recyclingverfahren automatisch zugeordnet. Dieser Vorgang wird für alle technisch realisierbaren Demontagezustände des Produktes durchgeführt. Als Ergebnis ergibt sich somit die Beschreibung aller möglichen Demontage- und Recyclingzustände eines Produktverbundes hinsichtlich Recyclingkosten/-erlöse und Recyclingquoten.

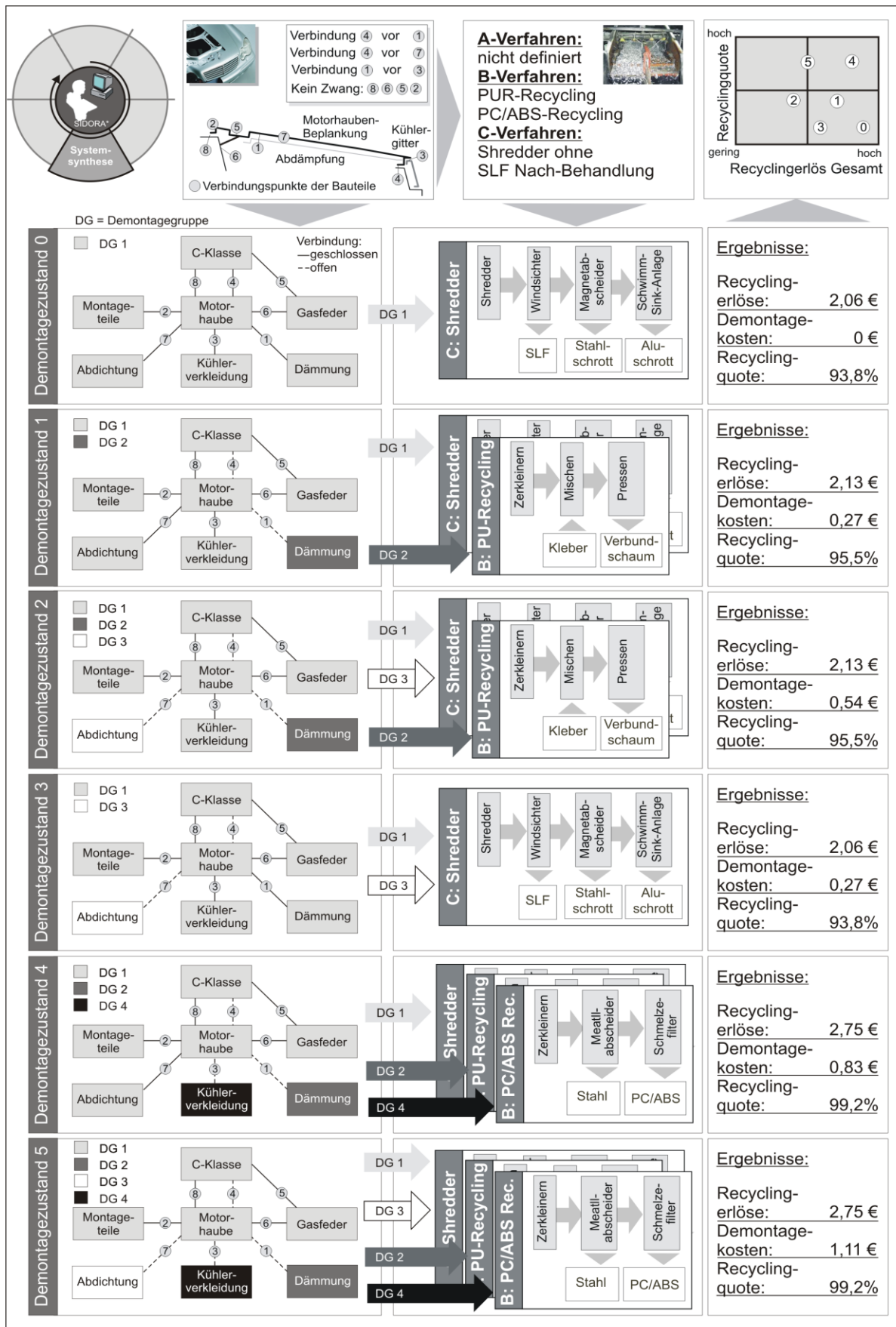


Abbildung 5.14: Systemsynthese

5.3.4 Systembewertung

Das Ziel der Bewertung ist es, aus den ermittelten Lösungsmöglichkeiten die optimale Kombination auszuwählen, indem der Wert, bzw. der Nutzen der Lösungsmöglichkeiten in Bezug auf die vorher definierte Zielvorstellung ermittelt wird. Letzteres ist unbedingt notwendig, da der Wert einer Lösung nie absolut, sondern nur in Bezug auf diese Zielvorstellungen gesehen werden kann. Zur Durchführung einer Bewertung müssen nach Daenzer /DAE 94/ folgende Bedingungen erfüllt sein:

- ☐ Es müssen unterscheidbare Lösungsalternativen bekannt sein, zwischen denen gewählt werden soll.
- ☐ Es sind Bewertungskriterien notwendig, die zum Ausdruck bringen, welche Eigenschaften als wesentlich erachtet werden.
- ☐ Es sind geeigneten Bewertungsverfahren erforderlich, um die zu beurteilenden Varianten hinsichtlich der Erfüllung dieser Kriterien einzustufen.

Die unterscheidbaren Lösungsalternativen als Eingangsdaten für die Bewertung bilden die in der Systemsynthese ermittelten Demontage- und Recyclingzustände der einzelnen Demontagemodule. Die Kriterien für die Bewertung der Recyclinggerechtigkeit eines Fahrzeuges sind im Rahmen der Zieldefinition festzulegen. Gemäß Kapitel 5.3.1 sind dies die beim Recycling erreichbaren Recyclingquoten für das Gesamtfahrzeug sowie die dabei anfallenden Recyclingkosten bzw. Erlöse. Die Zielsetzung der Bewertung ist es, diejenige Verwertungsoption zu ermitteln, die unter Berücksichtigung der definierten Randbedingungen den höchsten Nutzen (Grad der Zielerfüllung) aufweist.

Zur Lösung des Problems werden die ermittelten Verwertungsoptionen der einzelnen Demontagemodule auf Gesamtfahrzeug-Ebene kombiniert und hinsichtlich der entsprechenden Zielsetzungen bewertet. Um die möglichen Kombinationen für eine Bewertung des Gesamtfahrzeuges zu reduzieren ist zunächst eine Vorauswahl an so genannten effizienten Verwertungsoptionen für die einzelnen Demontagemodule zu treffen. Diese können im zweiten Schritt für das Gesamtfahrzeug zusammengefasst und bezüglich den geforderten Gesamtfahrzeug Zielsetzungen bewertet werden.

Eine Verwertungsoption innerhalb eines Demontagemoduls gilt dann als effizient, wenn sie zulässig ist (d.h. wenn sie eine realisierbare Lösung charakterisiert) und

zugleich keine andere Lösung existiert, die bezüglich der Zielgrößen Recyclingquote und -kosten mindestens ebenso hohe Werte und im Hinblick auf eine Zielgröße einen höheren Wert annimmt.

Abbildung 5.15 veranschaulicht dies am Beispiel der in Kapitel 5.3.3 analysierten Motorhaube. Demontagezustand 4 kennzeichnet hierbei eine effiziente Konstellation: Alle anderen Demontagezustände, die innerhalb der schraffierten Fläche unterhalb von Demontagezustand 4 liegen sind nach dem Effizienzkriterium eindeutig unterlegen. Sie erreichen sowohl eine geringere Recyclingquote als auch einen geringeren Gewinn. Lediglich Demontagezustand 0 erreicht einen höheren Gewinn und stellt somit ebenfalls eine effiziente Lösungsmöglichkeit dar.

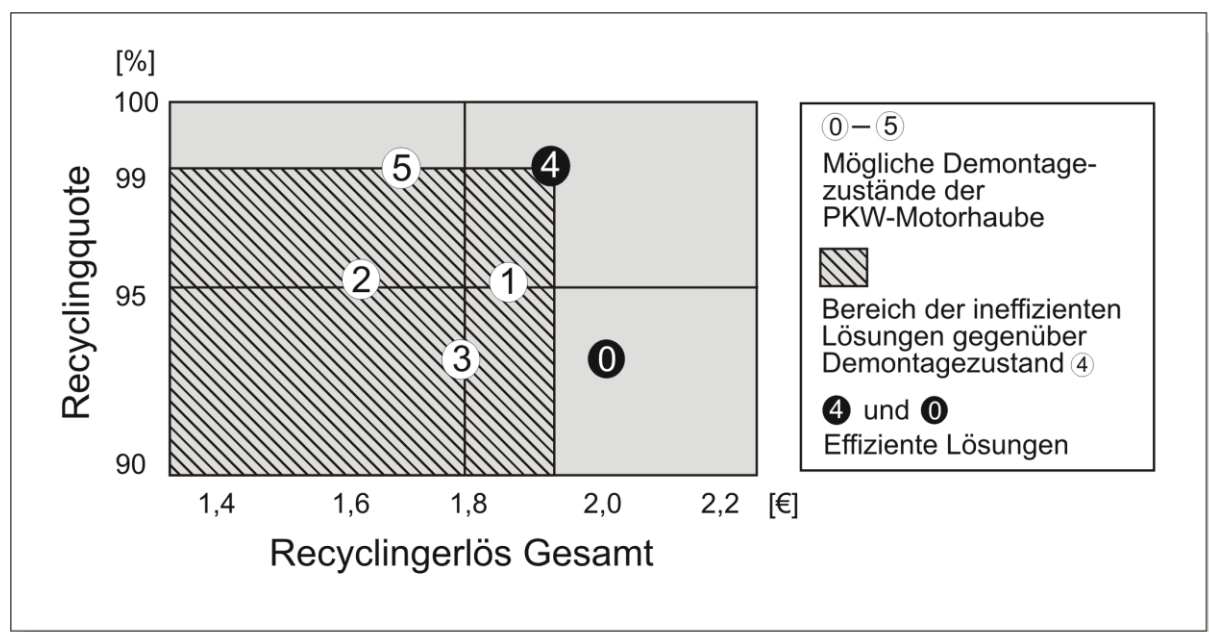


Abbildung 5.15: Systembewertung Demontagemodul

Die Auswahl der effizienten Lösungen wird gemäß der beschriebenen Vorgehensweise für jedes Demontagemodul ermittelt. Mit der Bestimmung der effizienten Lösungen je Modul ist das Entscheidungsproblem jedoch nicht gelöst. Es muss noch eine Auswahl aus den effizienten Lösungen der einzelnen Demontagemodule getroffen werden. Um dies zu ermöglichen, werden im zweiten Schritt die einzelnen Demontagemodule auf Gesamtfahrzeug-Ebene verknüpft und hinsichtlich den definierten Zielsetzungen bewertet. Diese können je nach gewählter PKW Recyclingstrategie folgendermaßen formuliert werden:

- ☐ Maximal technisch realisierbare Recyclingquote
- ☐ Recyclingquote 95% bei minimalen Kosten
- ☐ Wirtschaftlich optimale Verwertungsoption

Das Ergebnis der Systembewertung ist die Bestimmung derjenigen Kombination aus Demontage- und Recyclingzuständen, mit der die Gesamtfahrzeug Zielsetzungen am besten erreicht werden können.

5.3.5 Systemauswertung

Ausgehend von den generierten Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes werden im Rahmen der Auswertung die recyclingbezogenen Schwachstellen ermittelt sowie Optimierungspotenziale für das Produkt- bzw. dessen Recyclingkonzept aufgezeigt. Dabei kann eine Vielzahl von unterschiedlichen Maßnahmen zum Tragen kommen. Neben den konstruktiven Einflussmöglichkeiten wie Änderungen am strukturellen Produktaufbau, der Wahl der Verbindungstechnik und der Materialauswahl spielt ebenso die Wahl der eingesetzten Recyclingtechnik eine wesentliche Rolle. Je nach Betrachtungs-Schwerpunkt und Entwicklungsphase kommen daher unterschiedliche Vorgehensweisen zum Einsatz.

In der Planungsphase werden auf Gesamtfahrzeug-Ebene die unterschiedlichen zukünftigen Recyclingszenarien ausgewertet. Dabei werden die Auswirkungen von verschiedenen Entwicklungstendenzen, z.B. alternative Recyclingmöglichkeiten für die Shredderleichtfraktion, auf das Recycling des Gesamtfahrzeugs analysiert. Das Ergebnis der Auswertung in der Planungsphase ist die Festlegung der gewählten Szenarien, um somit den Handlungsrahmen für den weiteren Entwicklungsprozess festzulegen. Des Weiteren wird der daraus ableitbare produktbezogene Handlungsbedarf zur Zielerreichung auf Gesamtfahrzeug-Ebene festgelegt.

In der Technologiephase ist der Betrachtungsschwerpunkt die Modul-Ebene. Die Auswertung erfolgt dabei in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die erarbeiteten konstruktiven Lösungsmöglichkeiten innerhalb eines Moduls miteinander verglichen. Je nach Ergebnis der Auswertung ist gemeinsam mit der Konstruktion eine Optimierung der Lösungsansätze zu entwickeln, indem sowohl die Werkstoffauswahl und Baustuktur des Produktes gezielt variiert werden. Durch die Veränderungen innerhalb eines Moduls können sich jedoch neue Auswirkungen bzw. Anforderungen

für die andere Fahrzeugmodule ergeben. Dementsprechend sind in einem zweiten Schritt die Module untereinander zu vergleichen, um daraus weitere Handlungsfelder zur Reduzierung der Abfallmengen und Kosten zu identifizieren. Dabei handelt es sich um eine Grobplanung des Recyclingkonzeptes unter Berücksichtigung der vorläufigen Baustruktur und Werkstoffzusammensetzung des Produktes. Es wird somit im Rahmen der Auswertung innerhalb der Technologiephase festgelegt, ob ein Bauteil zur Zielerfüllung aus dem Fahrzeugverbund demontiert und separat behandelt werden muss oder gemeinsam mit der Restkarosse über den Shredderprozess und den nachgeschalteten Verwertungsmöglichkeiten recycelt werden kann.

Eine detaillierte Auswertung auf Bauteilebene erfolgt in der Fahrzeugphase. Dabei werden die Verbindungstechniken, Materialien der Einzelteile sowie mögliche Demontageverrichtungen gezielt analysiert. Als Orientierungshilfe zur Ableitung von Optimierungsmöglichkeiten können dabei die bekannten Gestaltungsregeln der recyclinggerechten Produktgestaltung dienen. Mit Hilfe des Planungsinstrumentes sind die Auswirkungen zu quantifizieren und deren Nutzen zu bewerten.

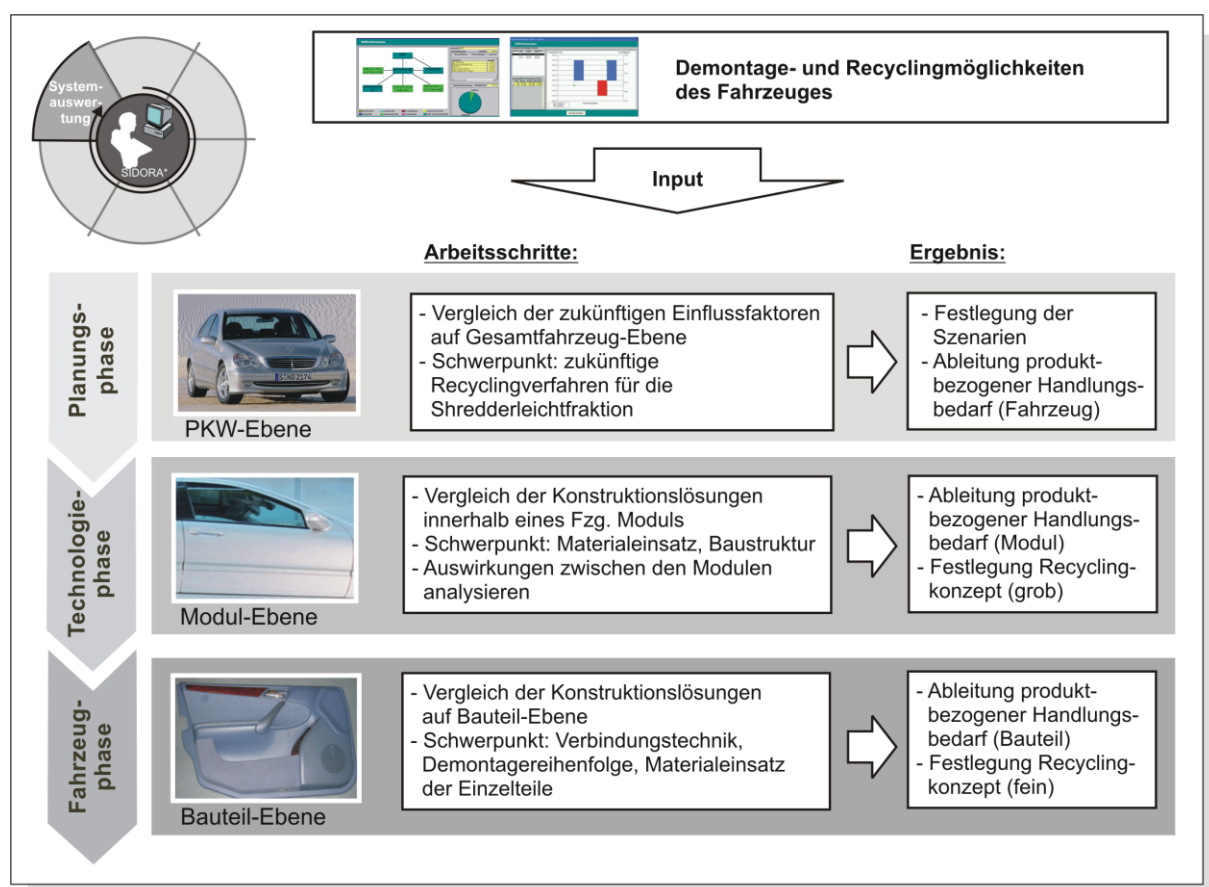


Abbildung 5.16: Detaillierung der Auswertung entlang des Entwicklungsprozesses

Abbildung 5.16 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb der Systemauswertung. Das beschriebene Vorgehen gliedert sich nach den einzelnen Phasen des Fahrzeugentwicklungs-Prozesses und orientiert sich bei der Ableitung von Optimierungsmöglichkeiten am zunehmenden Detaillierungsgrad des Produktes. Es kann jedoch nicht garantieren, dass die „optimale“ Konstruktionslösung gefunden wird, da die erzielbaren Verbesserungen im Wesentlichen von der Kompetenz des Konstrukteurs und den erarbeiteten Lösungsmöglichkeiten abhängt.

5.4 Aufbau des Planungsinstrumentes SIDORA

Ausgehend von den definierten Aufgaben innerhalb des Recyclingproblemlösezyklus wird im folgenden Kapitel der Aufbau und die Elemente des dazugehörigen Planungsinstrumentes SIDORA beschrieben. Als Ausgangspunkt werden zunächst die rechner-spezifischen Module vorgestellt. Darauf aufbauend wird die Vorgehensweise zur Erstellung eines Demontage- und Verwertungskonzeptes innerhalb der Software anhand eines Flussdiagramms erläutert.

Das Planungsinstrument ist als Access Datenbank aufgebaut. Zur Verwaltung der Daten sind unter dem Sammelbegriff Datenpflege die Prozeduren zusammengefaßt, die für das Füllen der Datenbank mit Produkt-, Demontage- und Recyclinginformationen zur Verfügung stehen (Kapitel 5.4.1 bis 5.4.3). Unter dem Begriff Datenbearbeitung wird die Simulation der Demontage- und Recyclingmöglichkeiten durchgeführt, sowie die Ergebnisse bewertet und analysiert (Kapitel 5.4.4).

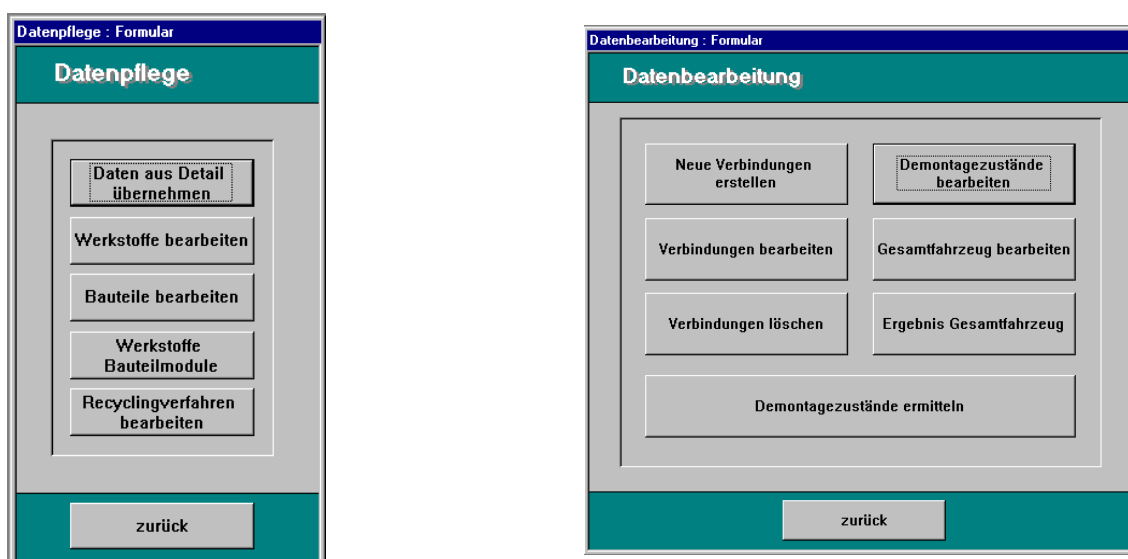


Abbildung 5.17: Datenpflege und Datenbearbeitung im Planungsinstrument

5.4.1 Aufbau des Produktmodelles

Zentraler Bestandteil des vorgestellten Datenmodelles ist das Produktmodell. Es setzt sich aus dem Produktstruktur-, Werkstoff- und Gewichtsmodell zusammen.

Im Produktstrukturmodell wird die Zusammensetzung eines Produktes aus Baugruppen und/oder Bauteilen durch eine hierarchische Erzeugnisstruktur beschrieben. Hierbei stellt das Bauteil die kleinste, aus einem oder mehreren Werkstoffen bestehende Einheit des Produktes dar. Die Zusammensetzung der Bauteile zu einer größeren Einheit wird als Baugruppe definiert. Bei komplexen Produkten wie Automobilen werden häufig noch übergeordnete abgrenzbare Baugruppenumfänge, so genannte Module, definiert. Sie untergliedern einen PKW in die drei Hauptebenen Hauptmodule, Module und Submodule. Die Darstellung der Produktstruktur erfolgt meist tabellarisch in Form von Strukturstücklisten oder grafisch als Strukturbaum. Abbildung 5.18 zeigt die Modularisierung eines PKW am Beispiel Motorhaube.

Werkstoffe Module anzeigen

Fahrzeug: C203
Hauptmodul: Klappen/Koffiegel
Modul: Motorhaube
Submodul: Rohbau

Strukturtiefe 1: Montageteile
Strukturtiefe 2: Kühlerverkleidung
Strukturtiefe 3: Montageteile
Strukturtiefe 4: Abdämpfungen
Strukturtiefe 5:

Bauteile mit Untermodulen:

Bauteil
ABDAEMPFG MOTORHAUBE
Abdämpfungen
ABDICHTUNG MOTORHAUBE
GASFEDER
KUEHLERVERKLEIDUNG
Kühlerverkleidung
MONTAGETEILE
Montageteile
Montageteile
Motorhaube
MOTORHAUBE
Rohbau

Gewähltes Modul: Motorhaube

Werkstoffanzeige Modul

☐ Werkstoffklasse ☐ Werkstoffgruppe ☒ Werkstoff

Werkstoff	Gewicht	Recyclinganteil
ABS, galvanisiert	0,40 kg	0,0%
Elastomer unbekannten Typs	0,22 kg	0,0%
PA6-GF 15	0,50 kg	0,0%
PUR Weichschaumstoff	0,44 kg	0,0%
Stahl/Stahlguß oder Sinterguß	23,26 kg	0,0%

Zurück

Abbildung 5.18: Produktstruktur, Werkstoff- und Gewichtsdaten in SIDORA

Zur vollständigen Beschreibung des Produktmodelles werden die einzelnen Bauteile mit den entsprechenden Werkstoff- und Gewichtsdaten verknüpft. Beim Aufbau des Werkstoffmodells ist eine einheitliche Definition und Klassifizierung der Werkstoffe von besonderer Bedeutung, da sie die Grundlage für die Zuordnung der Bauteile zu den Recyclingverfahren darstellt. Die Klassifizierung der im Fahrzeugbau eingesetzten Werkstoffe erfolgt dabei gemäß VDA Richtlinie 231-106 /VDA 97/. Die einzelnen Werkstoffe werden in Werkstoffhaupt- (z.B. Polymere) und deren Werkstoffuntergruppen (Thermoplaste, Duromere, Elastomere) untergliedert. Durch die Verknüpfung der Bauteil-, Gewichts- und Werkstoffdaten ergibt sich somit eine konsistente und redundanzfreie Darstellung des Produktes im Planungsinstrument.

Diese hierarchische Form der Datenmodellierung ist für die Ableitung der unterschiedlichen Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes lediglich als Ausgangspunkt im Sinne einer Informationsbasis nutzbar. Das Problem ist, dass sich die verschiedenen Demontagekombinationen des Produktes aus der beschriebenen hierarchischen Strukturierung nicht direkt ableiten lassen, da keinerlei Informationen über die Art und Anzahl der Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen vorhanden ist. Dieser Nachteil lässt sich durch Überführung der hierarchischen Produktstrukturierung in einen so genannten Teile-Verbindungs-Graphen (TV) beheben. In einem TV werden die Relationen zwischen den Bauteilen und den entsprechenden Verbindungselementen zueinander dargestellt. Durch das „Lösen“ einer Verbindung im TV wird ein Bauteil oder eine Kombination von Bauteilen aus dem Teileverbund herausgelöst. Dieser Vorgang entspricht der Durchführung eines Demontageprozesses. Auf diese Weise entsteht ein Modell aus dem sich die verschiedenen Demontagemöglichkeiten des Produktes direkt ableiten lassen (siehe Abbildung 5.19).

Die Grundlage für den Aufbau des TV ist das bereits beschriebene hierarchische Produktmodell. Die Relationen zwischen den Bauteilen und den Verbindungselementen werden in einer neu aufzubauenden Verbindungstabelle verwaltet. Das zentrale Datenobjekt der Verbindungstabelle ist das Verbindungselement. Ihm werden die Bauteile, die durch die Verbindung zusammen gehalten werden, zugeordnet. Des Weiteren wird die Art und Anzahl der Verbindungselemente angegeben.

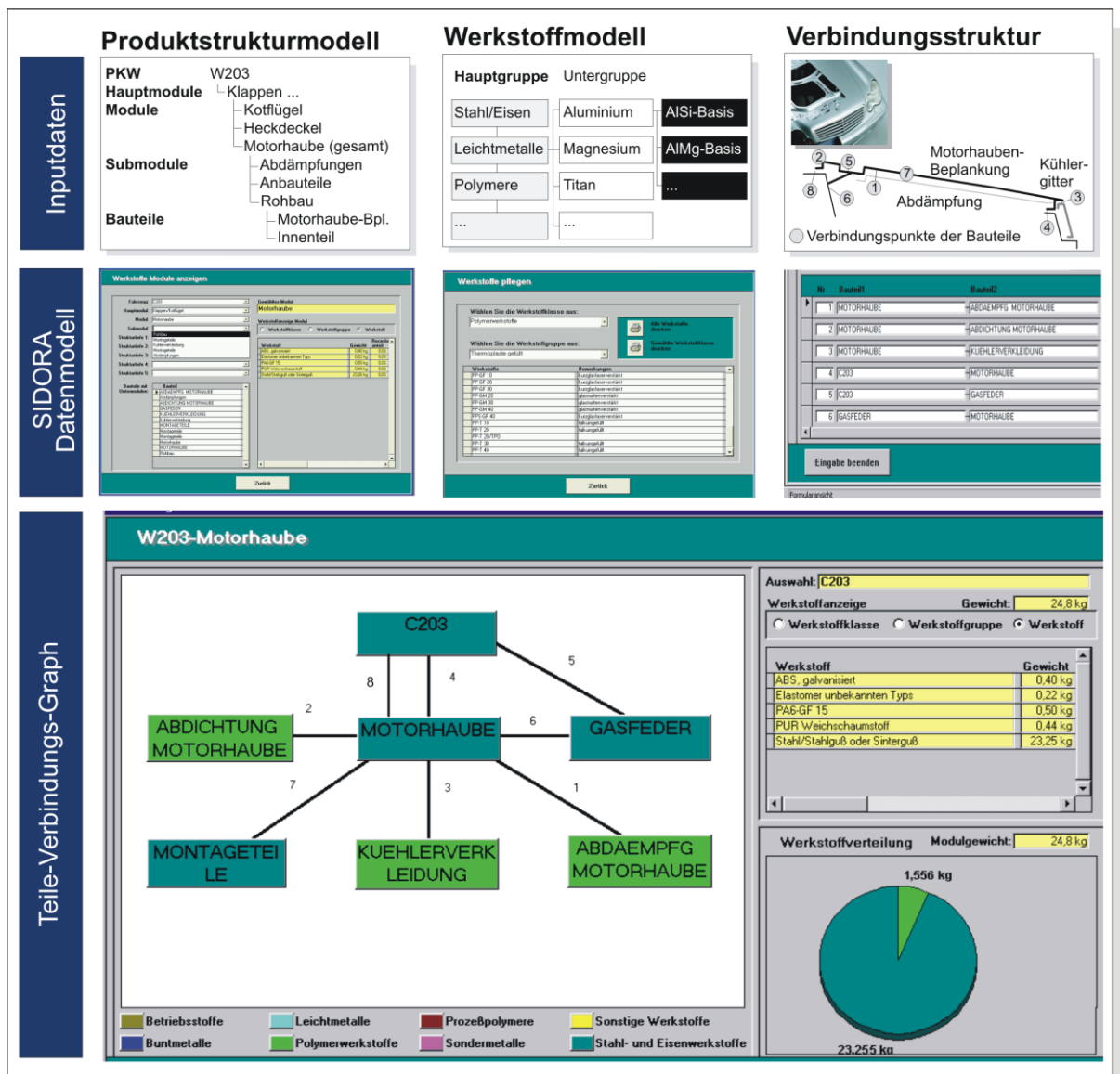


Abbildung 5.19: Aufbau des Produktmodelles im Planungsinstrument SIDORA

Aufgrund der großen Anzahl an Bauteilen und Verbindungselementen in einem Fahrzeug ist es notwendig, das Produktmodell aus mehreren abgrenzbaren TV aufzubauen. Die Strukturierung der TV erfolgt nach den bekannten Modulen des hierarchischen Produktmodelles, da diese bereits nach den Einbauorten und somit auch nach den Ausbau- bzw. Demontageorten gegliedert sind. Diese abgrenzbare TV werden i.F. als Demontagemodule des Fahrzeuges bezeichnet. Abbildung 5.20 zeigt die einzelnen Demontagemodule am Beispiel Mercedes-Benz C-Klasse.

Um die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fahrzeugmodulen darstellen zu können, wird in jedem Teileverbindungsgraph eine so genannte Hauptverbindung definiert. Sie stellt die Verbindung zwischen einem oder mehreren Bauteilen des

Moduls mit dem Gesamtfahrzeug dar. Am Beispiel der Motorhaube sind die Hauptverbindungen zwischen dem Rohbau der Motorhaube und der Fahrgastzelle gewählt (Verbindungen 4/5/8). Durch Lösen dieser Verbindungen ist es möglich, das komplette Modul aus dem Verbund Gesamtfahrzeug herauszulösen. Wird lediglich die Abdämpfung der Motorhaube aus dem Verbund herausgelöst (Verbindung 1), bleiben die restlichen Bauteile mit dem Gesamtfahrzeug verbunden.

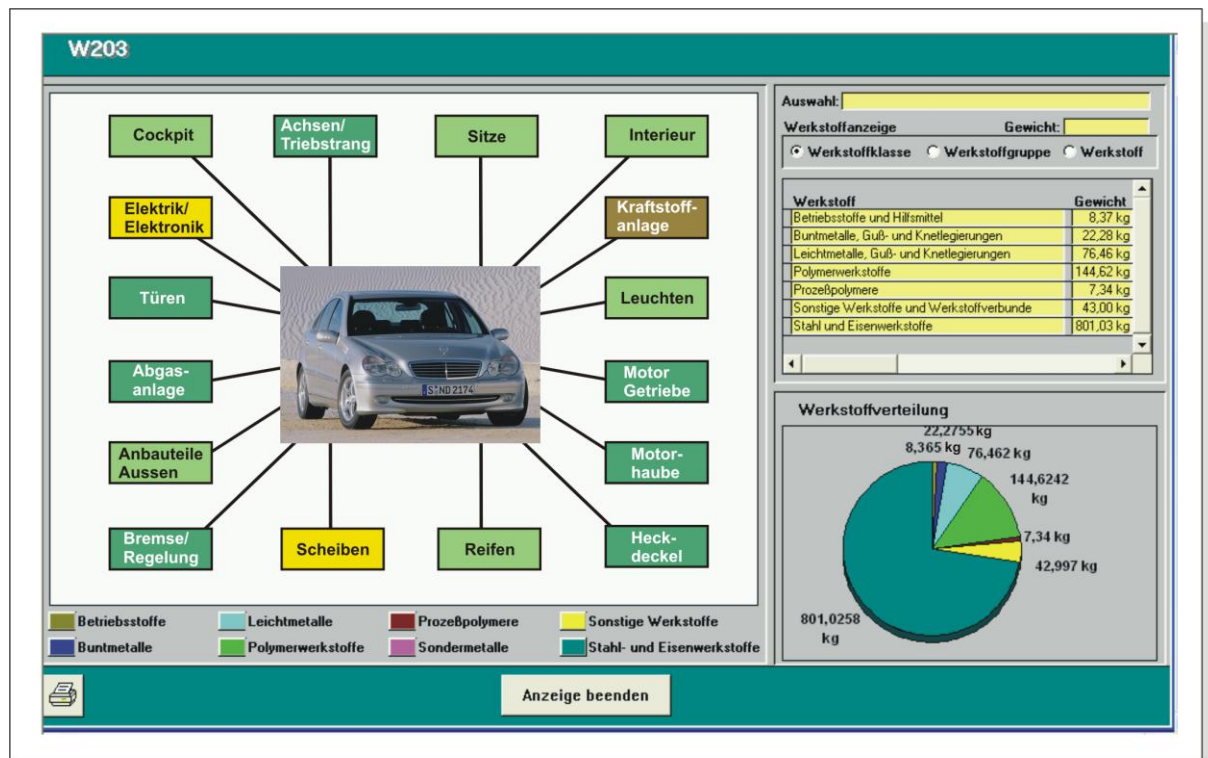


Abbildung 5.20: Demontagemodule am Beispiel Mercedes-Benz C-Klasse

Aus dem beschriebenen Produktmodell lassen sich die verschiedenen Demontage- und Recyclingmöglichkeiten direkt ableiten. Es enthält jedoch zunächst keinerlei Informationen über die Zugänglichkeit von Bauteilen und Verbindungselementen, sodass keine Aussagen über mögliche Demontagereihenfolgen und somit über die technisch möglichen Demontagezustände des Produktes aus dem TV ableitbar sind.

5.4.2 Aufbau des Demontagemodelles

Die Durchführung von Demontageprozessen ist bei einem komplexen Produktverbund nicht in beliebiger Reihenfolge möglich. In der Regel sind zwischen den einzelnen Demontageprozessen so genannte Vorrangbeziehungen zu berücksichtigen.

sichtigen. Eine Vorrangbeziehung zwischen zwei Demontageprozessen ist dann gegeben, wenn zur Demontage eines Bauteiles (bzw. zum Lösen dessen Verbindungselemente) die vorherige Demontage eines anderen Bauteiles (bzw. dessen Verbindungselemente) erforderlich ist. So ist aus Abbildung 5.19 am Beispiel Motorhaube ersichtlich, dass die Verbindung zwischen der Abdämpfung der Motorhaube und dem Rohbau (Verbindung 1) erst gelöst werden kann wenn die Motorhaube geöffnet ist (Verbindung 4). Diese Vorrangbeziehungen sind bei der Ableitung der technisch möglichen Demontagezustände des Produktes zu beachten.

Inputdaten

Teilverbindungsgraph

Vorrangbeziehungen

Verbindung 4 vor ①
Verbindung 4 vor ⑦
Verbindung 7 vor ③

Motorhauben-Beplankung
Kühlergitter
Abdämpfung

○ Verbindungspunkte der Bauteile

Lösezeiten/-werkzeuge

Prozess	Werkzeuge	Zeiten
Bereitstellen der Bauteile/Werkzeuge	Schraubendreher	Demontagezeiten
Trennen der Bauteile	Oszillierendes Messer	
Abführen u. Sortieren	...	

Demontagemodell

Verbindungen bearbeiten

Konzeptname: **W203-Motorhaube**

Fahrz: C203 Strukturtiefe 1-5: 1: [Auswahl] 2: [Auswahl] 3: [Auswahl] 4: [Auswahl] 5: [Auswahl]

HM: [Auswahl] M: [Auswahl] SM: [Auswahl]

kein Wunsch und kein Zwang: Verbindung wird nicht gelöst.
Wunsch: Betrachtung der Verbindung in gelöstem und ungelöstem Zustand.
Zwang: Verbindung muß gelöst werden.
Vorrang: Angabe der Verbindungen, die zu lösen sind, bevor diese Verbindung gelöst werden kann.

Nr	Bauteil1	Bauteil2	Demontage-werkzeug	Dem.zeit /s	Losbar Wunsch	Zwang	Vorrang
1	MOTORHAUBE	ABDAEMPFG MOTORHAUBE	Schrauber	20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	MOTORHAUBE	ABDICHTUNG MOTORHAUBE	Manuell	30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	MOTORHAUBE	KUEHLERVERKLEIDUNG	Schrauber	20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	C203	MOTORHAUBE	Schrauber	45	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	C203	GASFEDER	Manuell	24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	GASFEDER	MOTORHAUBE			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vorrang: 4, 0

Formularansicht

Abbildung 5.21: Aufbau des Demontagemodelles in SIDORA

Neben den Vorrangbeziehungen werden zur Bestimmung der technisch möglichen Demontagezustände des Produktes noch weitere Restriktionen definiert:

- ☐ Schadstoffbefrachtete Bauteile (z.B. Pyrotechnische Bauteile, Trockenlegungsrelevante Bauteile) sind grundsätzlich zu demontieren, da diese Bauteile

gemäß Altautoverordnung nicht in den nachfolgenden Shredderprozess gelangen dürfen. Die Verbindungen dieser Bauteile müssen in jedem Fall gelöst werden und sind im Demontagemodell als Zwang-Verbindungen zu kennzeichnen.

- Bauteile, die aus demselben, bzw. einem kompatiblen Werkstoff bestehen, können in der Regel mit einem gemeinsamen Recyclingverfahren aufbereitet werden (z.B. Motorhaube und Scharniere aus Stahl). Bei diesen Bauteilen besteht kein Zwang, die entsprechenden Verbindungen zu lösen.

Zur vollständigen Beschreibung der Demontageprozesse müssen die Demontagezeiten und -werkzeuge, die zum Lösen des Verbindungselementes notwendig sind, ermittelt werden. Sie stellen die Basis für die Bestimmung der Demontageskosten dar. Um all diese Informationen in einer entsprechenden Form zu verwalten werden sie im Demontagemodell zusammengefasst. Durch die direkte Verknüpfung der Demontage Informationen mit den in der Teileverbindungstabelle definierten Verbindungselementen entsteht dadurch ein Modell, aus dem sich sämtliche technisch möglichen Kombinationen von Demontageprozessen ableiten lassen.

5.4.3 Aufbau des Recyclingmodelles

Für die Einbindung der relevanten Recyclingdaten in das Planungsinstrument SIDORA ist eine einheitliche Modellierung und Strukturierung der Recyclingprozesse erforderlich. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Zielgrößen gemäß Altfahrzeugverordnung (Verwertungsquote, -kosten) in dem Modell vergleichbar abgebildet werden können, um somit eine Bewertung zu ermöglichen.

Die Bestimmung der Verwertungsquoten erfolgt dabei anhand der Stoffflüsse, die beim Durchlaufen der einzelnen Recyclingprozesse entstehen. Die Eingangsgrößen der Recyclingprozesse (Input) bilden die Werkstoffe der einzelnen Bauteile bzw. Demontagegruppen. Durch entsprechende Aufarbeitungs- bzw. Aufbereitungsprozesse wird der Verbund von verschiedenen Stoffen in sortentypische Fraktionen überführt (Output). Diese lassen sich wiederum als werkstoffliche, rohstoffliche, energetische Ressource nutzen oder gezielt als Reststoff deponieren.

Die eingesetzten Verfahren lassen sich in die Grundoperationen Teilen und Trennen gliedern. Unter dem Begriff Teilen werden diejenigen Vorgänge zusammengefasst,

die den Zusammenhalt zwischen den Stoffen aufheben. Demgegenüber sind unter dem Begriff Trennen diejenigen Vorgänge definiert, die die Einzelkomponenten von Stoffgemischen in verschiedenen Fraktionen ansammeln /LÖH 95/.

Die Beurteilung des Teilens ist durch den Aufschlussgrad L möglich. Dabei wird der Anteil des geteilten Materials T an der Gesamtmenge G gemessen $L=T/G$. Der Anteil des ungeteilten Materials wird mit $U=L-T$ bezeichnet. Die Teilung eines Stoffgemisches G vom Zustand 1 in den Zustand 2 lässt sich somit darstellen durch: $G= T1+U1 \rightarrow T2+U2$.

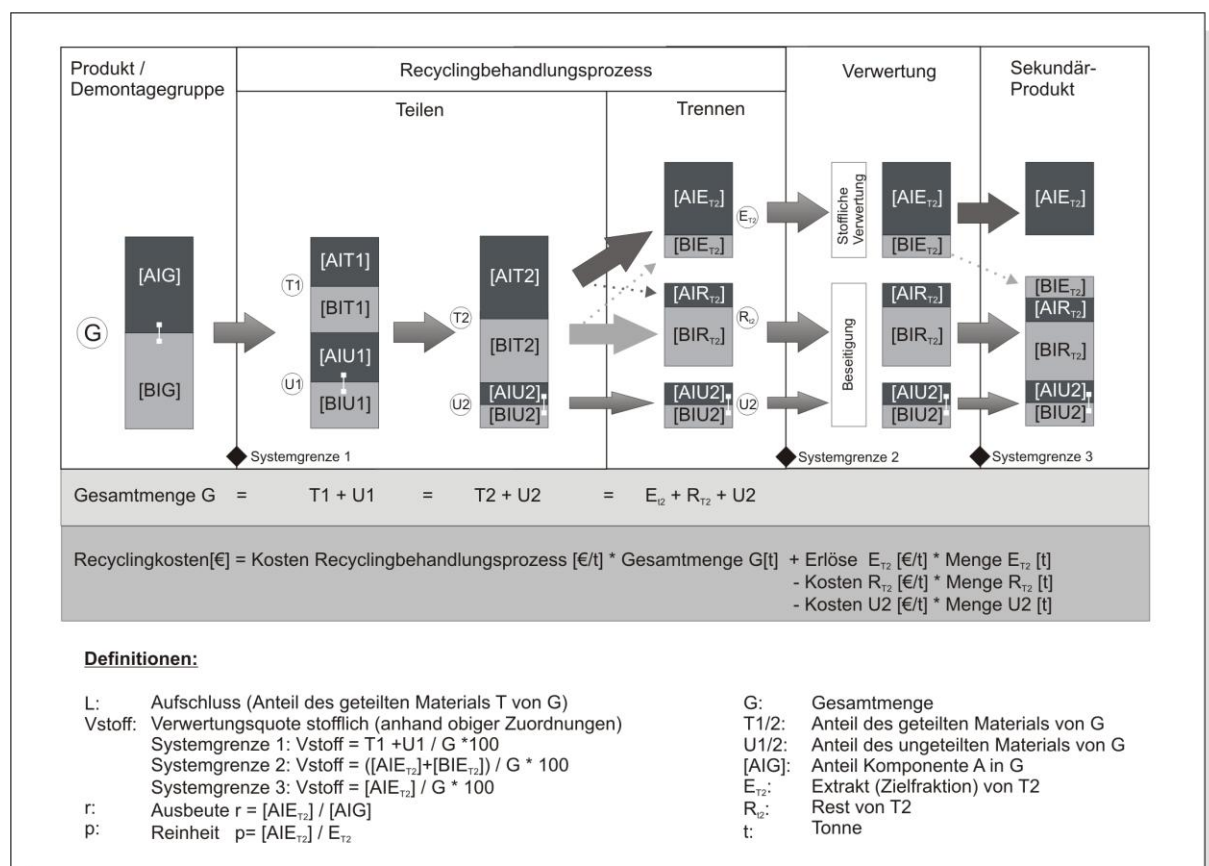


Abbildung 5.22: Modellierung der Recyclingverfahren in SIDORA

Die Beurteilung des Trennens erfolgt durch Analyse der bei den Trennprozessen erzeugten Teilmengen. Zielsetzung ist es, aus der bereits aufgeschlossenen Menge $T2$ ein Extrakt E_{T2} (Zielfraktion) auszusortieren, wobei ein Rest R_{T2} sowie das ungeteilte Material $U2$ übrig bleibt. Es gilt: $G=E_{T2}+R_{T2}+U2$. Da bei den Trennvorgängen jedoch immer Verunreinigungen im Extrakt als auch Verluste im Rück-

stand R auftreten ist die Güte der Sortierung (Reinheit) bei der Beurteilung zu berücksichtigen.

Unter Annahme einer binären Mischung der Gesamtmenge aus den Komponenten A (Zielkomponente) und B (Störstoff) ergibt sich $G=[AIG]+[BIG]$. Daraus lassen sich die Teilmengen Extrakt $E_{T2}=[AIE_{T2}]+[BIE_{T2}]$ und Rest $R_{T2}=[AIR_{T2}]+[BIR_{T2}]$ sowie die ungeteilte Menge U2 erzeugen. Als Kennzahlen des Trennvorganges wird die Reinheit des Extraktes $p=[AIE_{T2}]/E_{T2}$, sowie die Ausbeute der Zielkomponente $r=[AIE_{T2}]/[AIG]$ definiert.

Die bei den Trenn- und Teilungsprozessen erzeugten Fraktionen können nun zielgerichtet einem stofflichen bzw. energetischen Verwertungsverfahren oder einem Beseitigungsverfahren zugeführt werden. Für die Bestimmung der Verwertungsquoten ist hierbei die Festlegung von einheitlichen Systemgrenzen unabdingbar. Diese sind im Rahmen der Planungsphase der Produktentwicklung unter Berücksichtigung der gesetzlichen Einflussgrößen festzulegen (vgl. Kapitel 5.2.1). Anhand der in Abbildung 5.22 dargestellten Systemgrenzen und Zuordnungen können folgende Möglichkeiten zur Bestimmung der Verwertungsquoten unterschieden werden:

Systemgrenze 1: Die Bauteile/Demontagegruppen werden einem für das jeweilige Materialkonzept geeigneten Recyclingbehandlungsprozess zugeführt und gelten somit als verwertet. Es ergibt sich für die Gesamtmenge G folgende Verwertungsquote: $V_{\text{stoff}} = (T1+U1)/G \cdot 100$

Systemgrenze 2: Nach Durchlaufen des Recyclingbehandlungsprozesses wird das Extrakt E_{T2} einer stofflichen Verwertung zugeführt und die Restmenge R_{T2} und U2 deponiert. Es ergibt sich für die Gesamtmenge G folgende Verwertungsquote:
 $V_{\text{stoffl}} = ([AIE_{T2}]+[BIE_{T2}])/([AIG]+[BIG]) \cdot 100$

Systemgrenze 3: Das Extrakt E_{T2} wird bei der Verwertung in ein marktfähiges Produkt überführt, welches wieder als Ausgangswerkstoff für die Bauteilherstellung eingesetzt werden kann. Bei dem Verwertungsprozess erfolgt in der Regel eine Abtrennung der in der Zielfraktion E_{T2} enthaltenen Restkomponenten $[BIE_{T2}]$. Zum Beispiel werden am Stahlschrott anhaftende Stoffe im Umschmelzprozess in der Schlacke gebunden und deponiert. Unter Berücksichtigung der bei der Verwertung

entstehenden Abfallmengen ergibt sich für die Gesamtmenge G folgende Verwertungsquote: $V_{\text{stoffl}} = [AIE_{T_2}] / ([AIG] + [BIG]) \cdot 100$

Neben den Verwertungsquoten sind die Recyclingkosten im Modell zu berücksichtigen. Die Strukturierung ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die Recyclingbehandlungsprozesse zuzüglich den Kosten für die Deponierung der Restmengen R_{T_2} und U_2 abzüglich des erzielbaren Erlöses aus der Zielfraktion E_{T_2} .

Die beschriebene Strukturierung des Recyclingmodells wird im Folgenden für die drei festgelegten Recyclingkategorien anhand ausgewählter Prozesse präzisiert.

Beim **Produktrecycling** werden die in einem Altfahrzeug enthaltenen Bauteile einer erneuten Wieder- oder Weiterverwendung zugeführt. Die demontierten Bauteile werden entweder direkt an private Abnehmer verkauft oder durchlaufen zur Wiederherstellung der durch die Gebrauchsphase veränderten Produktmerkmale vorab einen Aufarbeitungsprozess. Die bei der Durchführung der Aufarbeitungsprozesse entstehenden Fraktionen sind Produkte zur Wieder-/Weiterverwendung (Austauscherzeugnisse), Abfälle zur stofflichen oder energetischen Verwertung und Abfälle zur Beseitigung. Am Beispiel Motoraufarbeitung werden i.F. die einzelnen Prozessschritte erläutert (s. Abbildung 5.23).

Bei den angelieferten Altmotoren werden im ersten Schritt alle Zusatzaggregate (Anlasser, etc.) demontiert und je nach technischem Zustand entweder gesondert aufgearbeitet oder der Eisen-Mischschrottfraktion zugeordnet. Danach werden die noch enthaltenen Betriebsflüssigkeiten aufgefangen und recycelt, Filter und Ölleitungen entnommen und der Motor komplett zerlegt. Lagerschalen, Kolben, Buchsen Dichtungen, Keilriemen, Ventilsitze und andere Verschleißteile werden grundsätzlich durch fabrikneue ersetzt. Diese Bauteile werden nach Werkstoffklassen separat verwertet oder entsprechend entsorgt. Alle anderen Bauteile werden gereinigt und nach strengen Prüfkriterien kontrolliert. Hierbei kommen verschiedenen Prüfmethoden u.a. zur Analyse von Rissbildungen zum Einsatz. Die einzelnen Bauteile werden je nach Befund mit unterschiedlichen fertigungstechnischen Prozessen aufgearbeitet (z.B. Hohnen). Die anschließende Montage zu Tauschmotoren findet analog der Serienproduktion fabrikneuer Aggregate statt.

Bei der Aufarbeitung zu Tauschmotoren werden ca. 72% des Gesamtgewichtes direkt wiederaufgearbeitet und einer erneuten Verwendung zugeführt. Von den restlichen 28% werden nochmals 97% als sortierte Fraktion einer stofflichen Verwertung zugeführt (Eisen-, Alu-, Grauguss-Mischschrott sowie die restlichen Betriebsstoffe). Nur ein Prozent, welches sich aus Dichtungen, Filtern, Ölkohle, etc. zusammensetzt, muss beseitigt werden. Gemäß den Definitionen nach Systemgrenze 2 entspricht dies einer Recyclingquote von 99%. Die bei dem Aufarbeitungsprozess entstehenden Kosten und Erlöse sind entsprechend den Prozessketten in Verfahrenskosten (Prüfen, Reinigen, Sortieren, etc.), Erlöse für die Fraktionen zur Verwendung (Austauscherzeugnisse) und Verwertung (Stahl, Alu, Grauguss-Fraktionen) sowie die bei der Deponierung der Restfraktionen entstehenden Beseitigungskosten gegliedert.

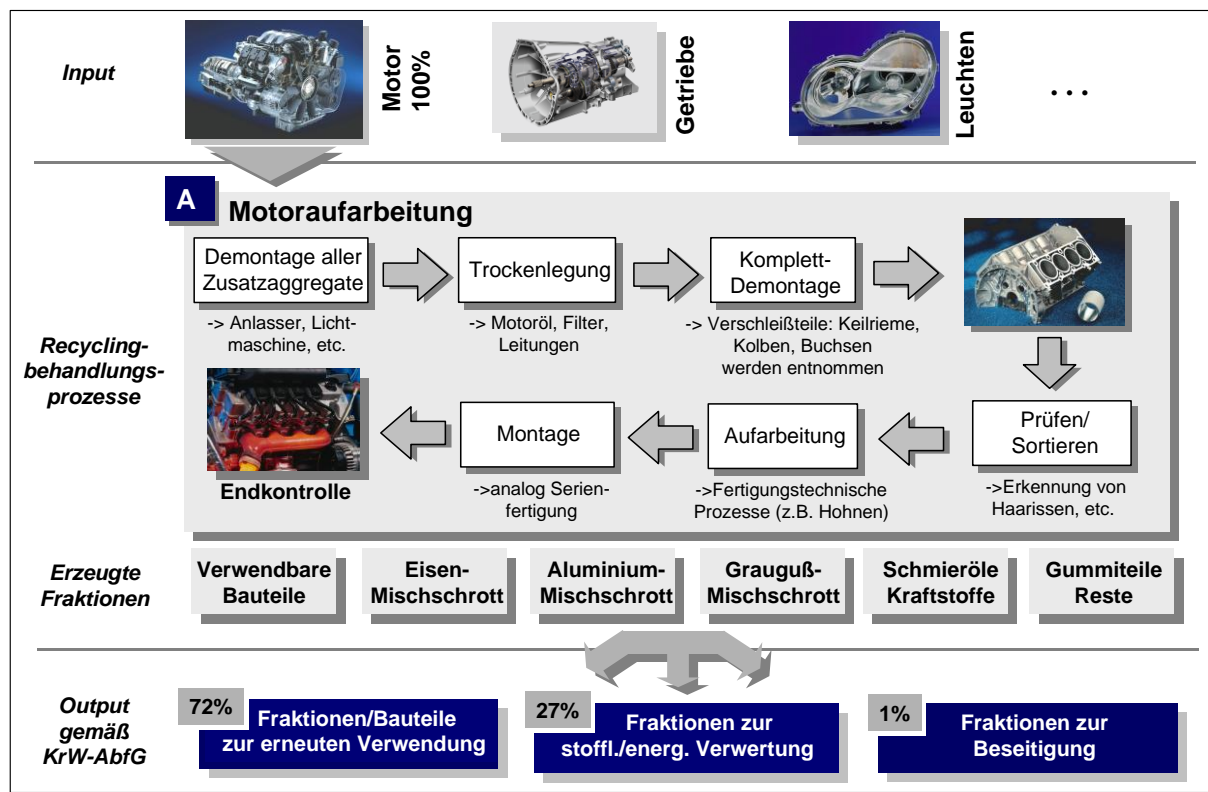


Abbildung 5.23: Prozessschritte Produktrecycling - Motoraufarbeitung

Das **Materialrecycling** verfolgt in erster Linie das Ziel, die in den Bauteilen eingesetzten Werkstoffe mit Hilfe verfahrenstechnischer Prozesse zurück zu gewinnen und einer erneuten Nutzung zuzuführen. Prinzipiell lassen sich die beim Altfahrzeugrecycling einsetzbaren Aufbereitungsverfahren in zwei Gruppen gliedern:

Unter **produktbezogenen Aufbereitungsverfahren** werden Verfahren definiert, die speziell für bestimmte Bauteile, Werkstoffe, bzw. Werkstoffkombinationen eingesetzt werden, um diese anforderungs- und zielgerecht wiederzuverwerten. Gemeinsames Merkmal ist, dass die entsprechenden Bauteile und Werkstoffe für die Zuordnung zu einem produktbezogenen Aufbereitungsverfahren aus dem Fahrzeugverbund demontiert werden müssen. Als Beispiele hierfür lassen sich Verfahren zur Aufbereitung von Verglasungen und Kunststoffen nennen. Aber auch Verfahren zur Aufbereitung so genannter Pflichtdemontageumfänge wie Airbags oder Betriebsflüssigkeiten werden den produktbezogenen Aufbereitungsverfahren zugeordnet. Am Beispiel Stoßfängerrecycling werden i.F. die einzelnen Prozessschritte erläutert (s. Abbildung 5.24).

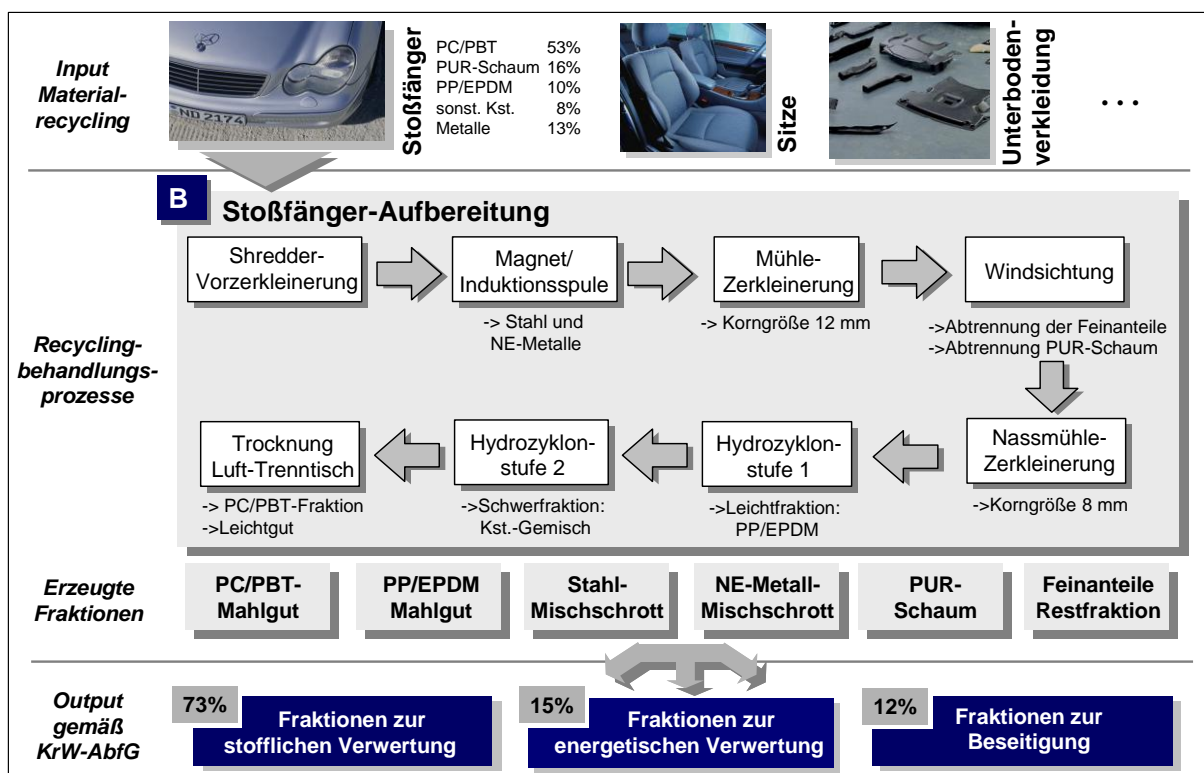


Abbildung 5.24: Prozessschritte Materialrecycling - Stoßfängeraufbereitung

Der Stoßfänger wird zunächst zur Vorzerkleinerung einem Shredder zugeführt. Mittels Über- und Unterbandmagneten bzw. einer Induktionsspule werden die Stahl und Ne-Metall Anteile separiert und einer stofflichen Verwertung zugeführt. Die restliche Fraktion wird mittels einer Mühle auf eine Korngröße von zwölf Millimeter zerkleinert. In dem nachgeschalteten Windsichter werden die Feinanteile (Kunststoffgemisch) sowie der PUR-Schaum abgetrennt und deponiert oder energetisch verwertet. Der Rest wird mit einer Nassmühle auf eine Korngröße von 8 Millimeter

zerkleinert. Durch die Zugabe von Wasser beim Mahlen wird durch die intensive Reibung bereits ein Reinigungseffekt erzielt, indem der an den Kunststoffen anhaftender Schmutz ausgeschwemmt wird. Die weitere Trennung der Kunststoffmischfraktion erfolgt mittels Hydrozyklone. In der ersten Stufe wird mit dem Trennmedium Wasser die Leichtfraktion PP/EPDM ausgetragen. Die Schwerfraktion wird in eine zweite Hydrozyklonstufe mit einer Schwertrübe als Trennmedium weitergeleitet. Die in der zweiten Stufe abgetrennte Leichtfraktion wird nach einer mechanischen Trocknung einem Klassiersieb zugeführt. Nach der Beschickung der Fraktion auf einem Luft-Trenntisch wird eine PC/PBT-Fraktion mit einem Reinheitsgrad von 99,5% erzielt. Die Schwerfraktion der zweiten Trennstufe (Restfraktion) wird deponiert, bzw. einer thermischen Beseitigung zugeführt. Gemäß den Systemgrenze 2 lassen sich 73% stofflich und 15% energetisch verwerten. Lediglich die Rest- und Feinfraktion muss beseitigt werden.

Die zweite Kategorie der Aufbereitungsverfahren wird unter dem Begriff **Shredderprozess** zusammengefasst. Im Shredderprozess wird der Rest des Altfahrzeuges aufbereitet. Abbildung 5.25 zeigt den prinzipiellen Ablauf des Shredderprozesses.

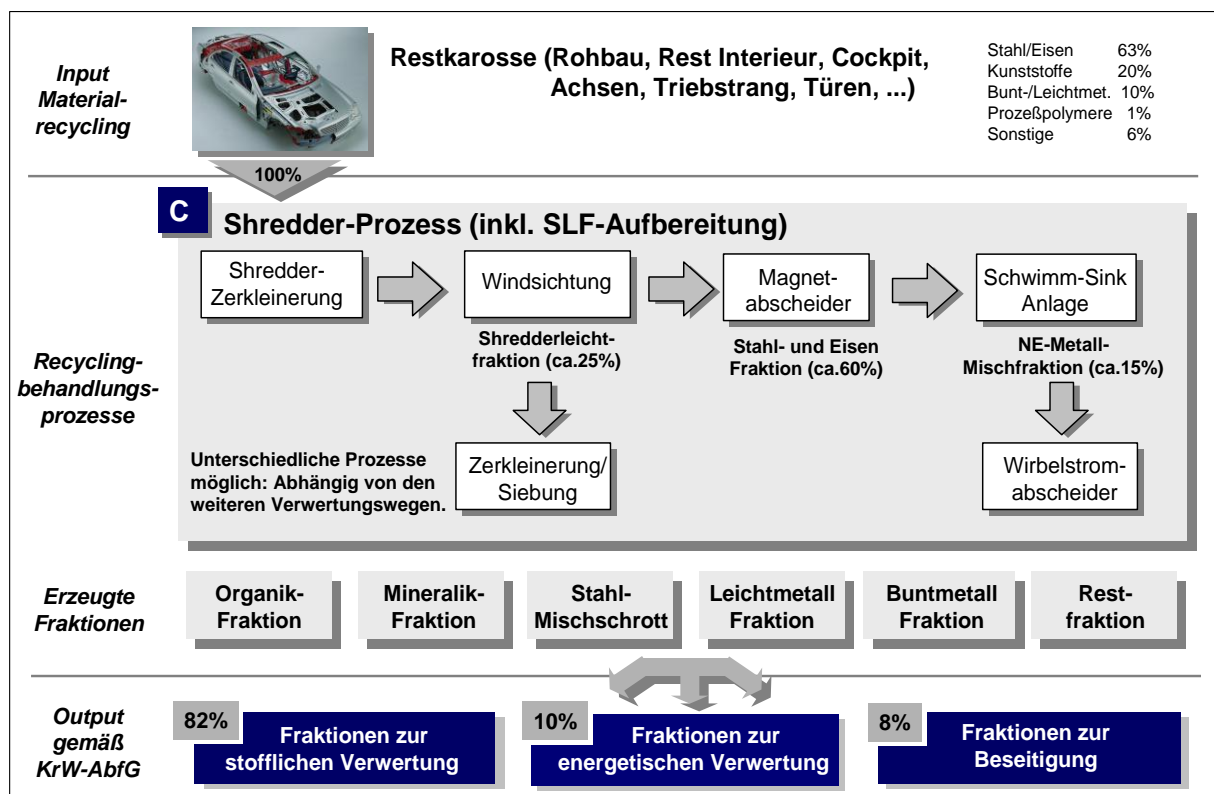


Abbildung: 5.25: Prozessschritte Materialrecycling - Restkarosse

Je nach weiterem Verwertungsweg ergeben sich insbesondere für die Shredderleichtfraktion (SLF) unterschiedliche Aufbereitungsverfahren. Wird beispielsweise die SLF energetisch verwertet, so ist im Rahmen der Aufbereitung lediglich eine Metallabtrennung erforderlich. Besteht das Ziel, die in der SLF enthaltenen Kunststoffe zurück zu gewinnen und stofflich zu verwerten, sind mehrere Zerkleinerungs-, Sieb- und Sortierschritte erforderlich /SOE 03/. Die beim Shredderprozess entstehenden Fraktionen werden entweder direkt verwertet (Stahlfraktion) oder durchlaufen zur weiteren Behandlung nachgeschaltete Sortier- und Trennstufen wie beispielsweise die Schwimm-Sink-Trennung oder SLF-Aufbereitung. Die bei diesen nachfolgenden Aufbereitungsverfahren anfallenden Abfälle zur Beseitigung und/oder Verwertung werden für die Ermittlung von Recyclingkosten und -quoten berücksichtigt.

Auf Basis der beschriebenen Strukturierung ist es möglich die Verwertungsquoten und –kosten der einzelnen Recyclingprozesse vergleichbar in das Datenmodell des Recyclingplanungsinstrumentes zu integrieren (siehe Abbildung 5.26).

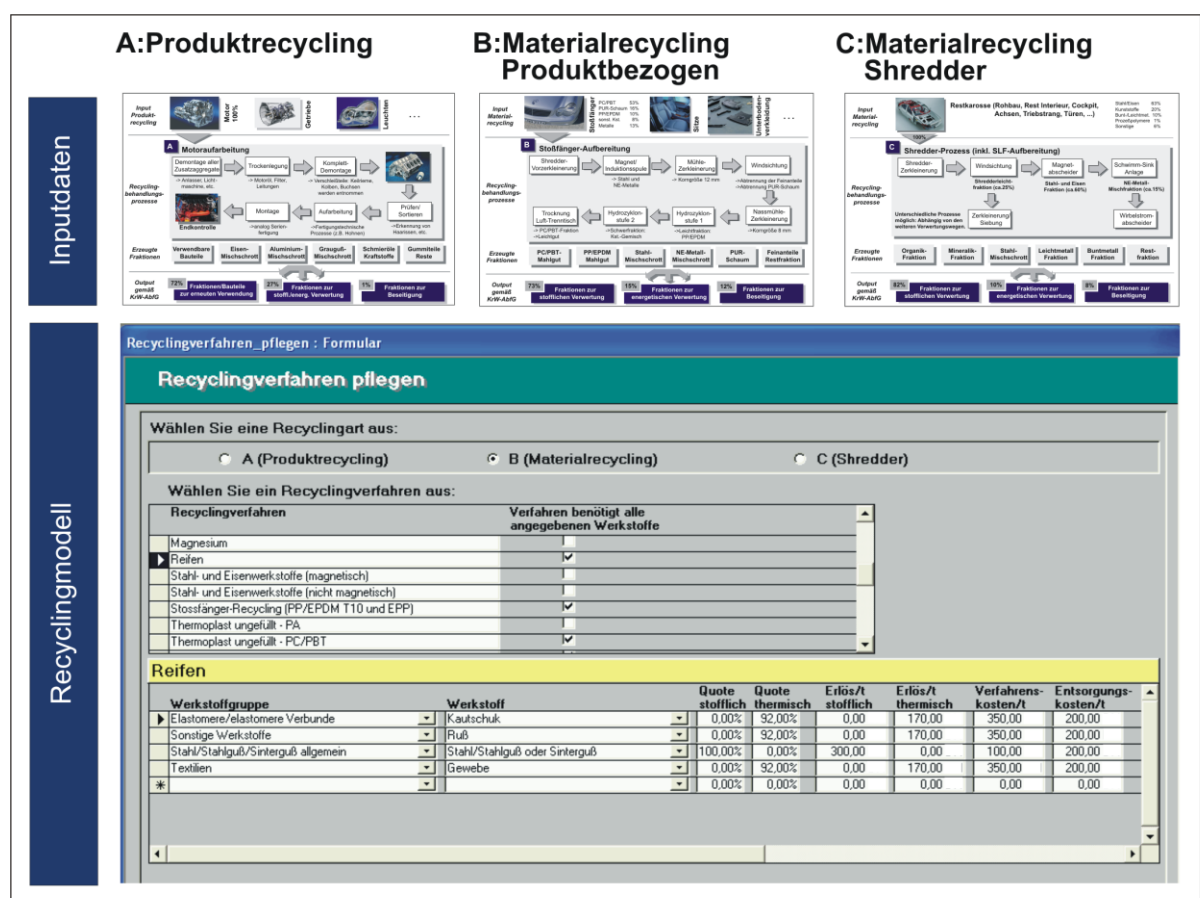


Abbildung 5.26: Aufbau des Recyclingmodelles in SIDORA

5.4.4 Simulation und Bewertung von Recyclingmöglichkeiten

Die Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes werden durch Verknüpfung der beschriebenen Produkt-, Demontage- und Recyclingmodelle erzeugt. Für ein Produkt, welches mit n Verbindungselementen verknüpft ist, gibt es theoretisch 2^n Kombinationsmöglichkeiten von Demontageprozessen und somit von Demontagezuständen. Die rechnerunterstützte Ableitung der möglichen Kombinationen von Demontageprozessen wird aus den Teileverbindungstabellen der einzelnen Demontagemodule generiert. Die Vielzahl an möglichen Kombinationen von Demontageprozessen lässt sich durch die bereits definierten Vorrang- und Zwangrestriktionen erheblich reduzieren. Am Beispiel der Motorhaube sind aus den 2^8 möglichen Demontagezuständen lediglich 6 technisch realisierbar.

Nach der Ermittlung aller technisch realisierbaren Demontagezustände werden die einzelnen Demontagegruppen den entsprechenden Recyclingverfahren automatisch zugeordnet. Dabei wird im ersten Schritt überprüft, ob es für die Demontagegruppe ein geeignetes Produktrecyclingverfahren gibt. Ist dies der Fall, so wird es den entsprechenden Bauteilen zugeordnet. Die Identifikation der Recyclingverfahren erfolgt hierbei über die Bauteilbezeichnung. Die Voraussetzung für die Zuordnung zu dem Produktrecyclingverfahren ist, dass das Bauteil vollständig aus dem Produktverbund herausgelöst ist, d.h. dass alle Verbindungselemente gelöst sind.

Gibt es kein Produktrecyclingverfahren, so wird im nächsten Schritt überprüft, ob es für die Demontagegruppe ein geeignetes produktbezogenes Materialrecycling gibt. Die Identifikation und Zuordnung zu einem produktbezogenen Materialrecycling erfolgt über die Werkstoffzusammensetzung der Demontagegruppe. Ist für den Materialverbund der Gruppe ein Recyclingverfahren definiert, so wird sie automatisch dem entsprechenden Verfahren zugeordnet. Die Voraussetzung für die Zuordnung zu einem Materialrecycling ist, dass die Demontagegruppe aus dem Gesamtfahrzeugverbund herausgelöst ist.

Ist für eine Demontagegruppe weder ein Produkt- noch Materialverfahren vorhanden oder besteht innerhalb der Demontagegruppe eine Verknüpfung zu dem Gesamtfahrzeug, so werden die Demontagegruppe bzw. die darin enthaltenen Werkstoffe automatisch dem Shredderprozess zugeordnet.

Die Ergebnisse der Simulation können graphisch oder in Tabellenform ausgegeben werden. Abbildungen 5.27 und 5.28 zeigen am Beispiel Motorhaube den Teileverbindungsgraph und das Ergebnisprotokoll für einen Demontagezustand.

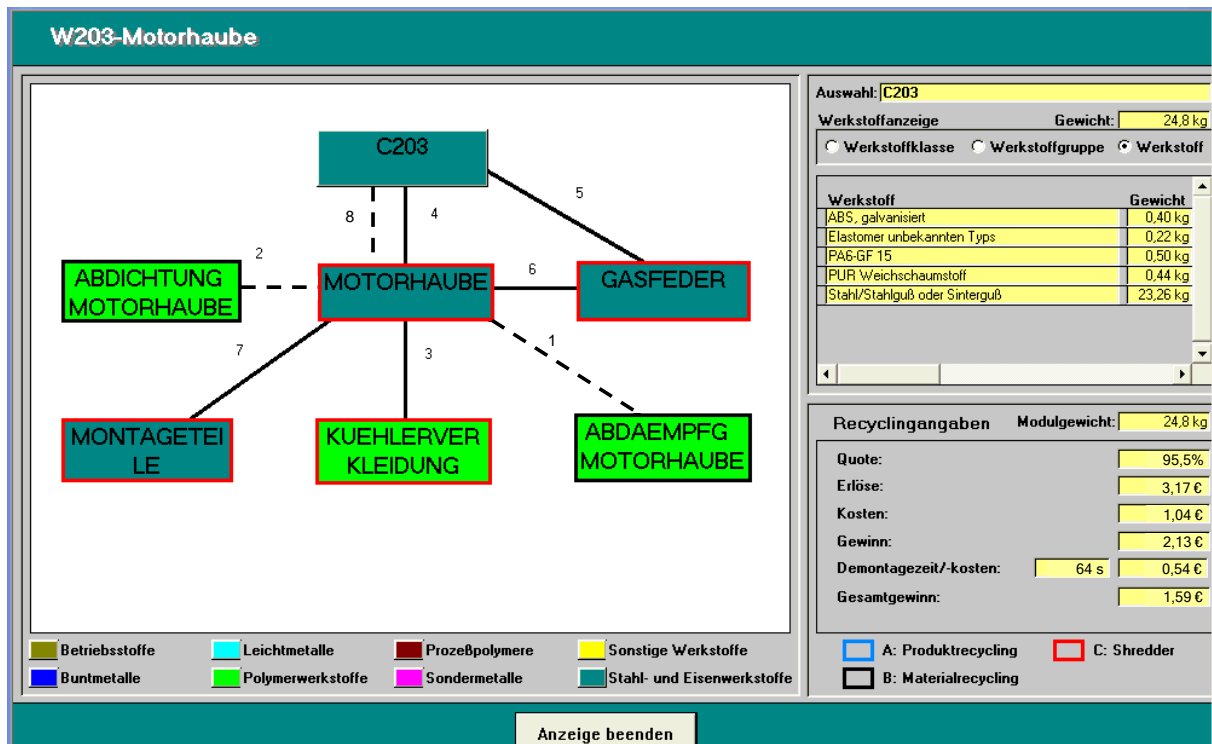


Abbildung 5.27: Teileverbindungsgraph eines Demontagezustandes

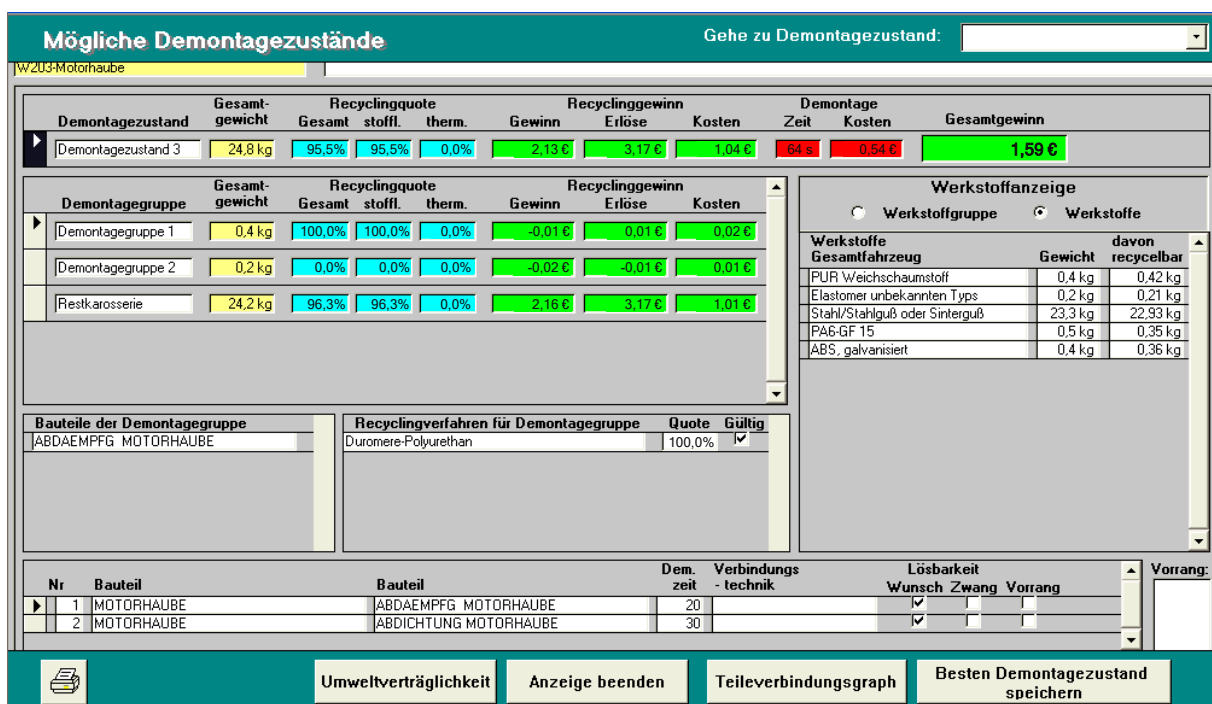


Abbildung 5.28: Ergebnisprotokoll eines Demontagezustandes

Im Rahmen des Bewertungsmoduls werden die einzelnen Demontage- und Recyclingmöglichkeiten des Produktes hinsichtlich der definierten Zielsetzungen bewertet. Dabei werden im ersten Schritt die effizienten Lösungen der einzelnen Demontagemodule selektiert (vgl. Kapitel 5.3.4) und im zweiten Schritt auf Gesamtfahrzeug-Ebene verknüpft. Als Ergebnis wird diejenige Kombination aus Demontagezuständen ausgegeben, welche die Gesamtfahrzeug Ziele am besten erreicht. Abbildung 5.29 zeigt die Umsetzung des Bewertungsmoduls im Planungsinstrument.

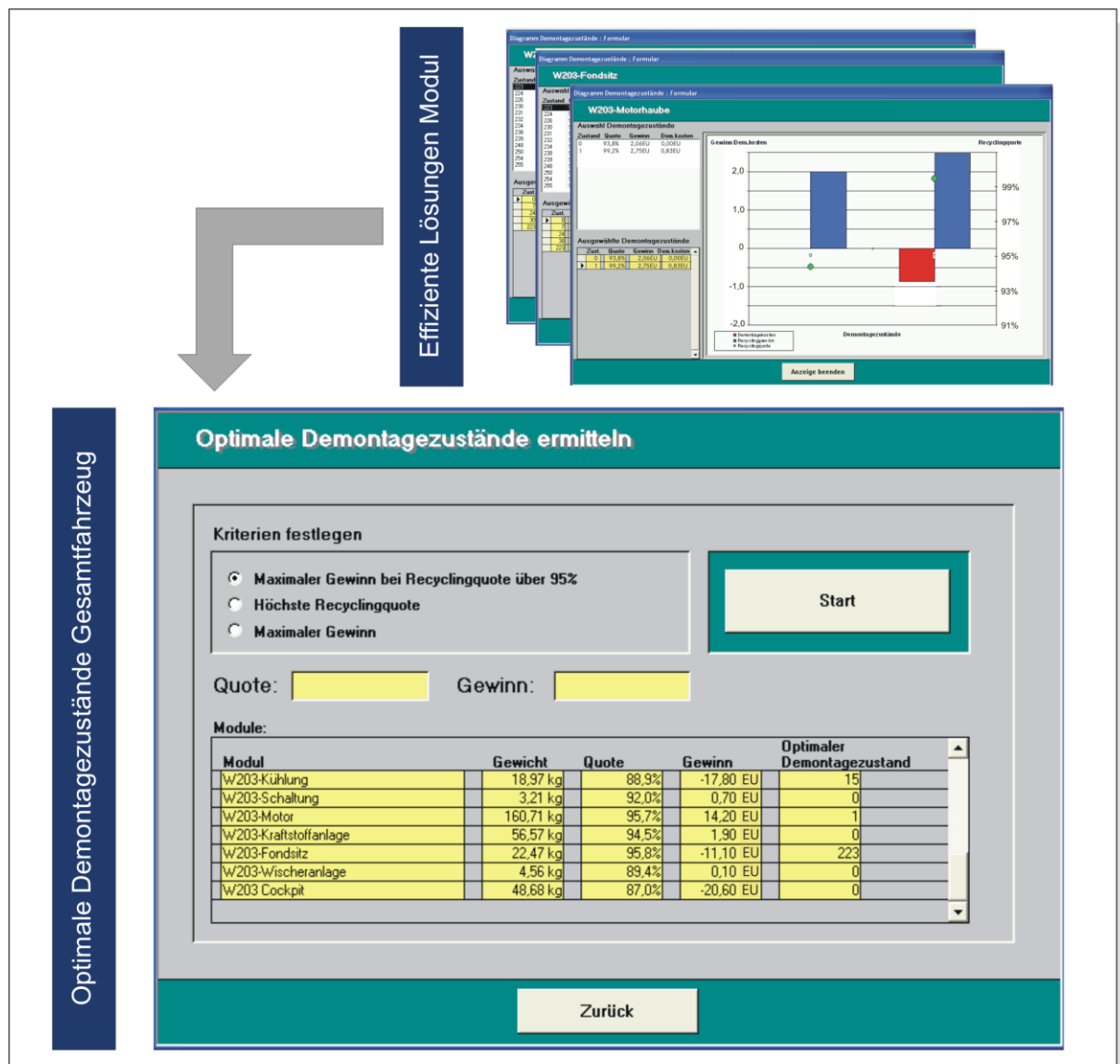


Abbildung 5.29: Bewertungsmodul Gesamtfahrzeug

5.4.5 Verfahrensablauf zur Datenermittlung Im Planungsinstrument

Ausgehend von den beschriebenen Funktionalitäten des Planungsinstrumentes SIDORA wird im Folgenden Kapitel der Verfahrensablauf zur Datenerhebung erläutert (siehe Flussdiagramm Abbildung 5.30).

Im erster Schritt werden die Produktdaten (Bauteile, Gewichte, Werkstoffe) aus dem vorhandenen Stücklistensystem (DIALOG) übernommen und in das Planungsinstrument eingelesen. Oftmals fehlen insbesondere bei Zukaufteilen detaillierte Werkstoff- und Gewichtsdaten, so dass die entsprechenden Stücklisten zunächst um die fehlenden Informationen ergänzt werden müssen.

Aufbauend auf die Stücklisteninformationen werden die Teileverbindungsgraphen für die einzelnen Demontagemodule erstellt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Verbindungsdaten unterscheidet sich je nach Entwicklungsphase. Im Rahmen der Planungs- und Fahrzeugphase können die Daten anhand von Demontageuntersuchungen an Vorgängerfahrzeugen, bzw. ersten Prototypen bestimmt werden. In der Technologiephase lässt sich die Verbindungsstruktur aus den CAD-Systemen, bzw. anhand von Konzeptskizzen und Explosionszeichnungen ableiten. Dabei ist auf einen sinnvollen Detaillierungsgrad zu achten. Besteht z.B. ein Modul oder eine Baugruppe aus Einzelteilen, die alle einen identischen Werkstoff besitzen, so wird lediglich das Gesamtmodul/Baugruppe in die Teileverbindungstabelle übernommen. Besonders deutlich wird dies am Beispiel Rohbau. So besteht das Modul Unterbau aus ca. 200 Einzelteilen. Für die Demontage- und Recyclingplanung ist es jedoch nicht erforderlich, alle Einzelteile im TV abzubilden, da sie alle aus Stahl bestehen und somit alle mit demselben Recyclingverfahren aufbereitet werden können. In diesem Fall wird lediglich das Gesamtmodul Unterbau in die Teileverbindungstabelle übernommen.

Das Ergebnis der Produktanalyse ist eine vollständige Beschreibung der einzelnen Fahrzeugmodule durch die jeweiligen Teileverbindungsgraphen, sowie deren Verknüpfungen zum Gesamtfahrzeug. Diese Daten stellen die Grundlage für die Ermittlung der Demontagedaten dar. Die Vorgehensweise ist wie folgt: Nach Auswahl des Demontageobjektes wird der Demontageschritt, d.h. das Lösen der Verbindungselemente durchgeführt. Hierbei ist vorab zu prüfen, ob die einzelnen Verbindungselemente und Verknüpfungen vollständig im TV-Graph abgebildet sind.

Darauf aufbauend werden die für die Durchführung des Demontageprozesses benötigten Demontagezeiten und -werkzeuge ermittelt und im Demontagemodell hinterlegt. Bei der Ermittlung der Demontagezeiten sind die einzelnen Teilschritte gemäß den Definitionen in Kapitel 2.1.3 zu berücksichtigen.

Nach der Bestimmung der Demontagezeiten und -werkzeugen werden im nächsten Schritt die entsprechenden Zwang-, Wunsch- bzw. Vorrangbeziehungen der einzelnen Verbindungselemente ermittelt. Hierzu ist zunächst abzuklären ob das untersuchte Demontageobjekt schadstoffbefrachtet ist und somit auf jeden Fall aus dem Fahrzeugverbund entfernt und mit einem separaten Verwertungsverfahren aufbereitet bzw. beseitigt werden muss. Ist dies der Fall so werden die Verbindungselemente des Bauteiles im Demontagemodell mit „Zwang“ gekennzeichnet. Die Vorrangbeziehungen zwischen den Demontageprozessen ergeben sich direkt aus dem Demontageablauf. Hierbei werden den untersuchten Verbindungselementen diejenigen Verbindungen, die zum Lösen der Verbindung im Sinne einer vorbereitenden Maßnahme erforderlich sind, direkt zugeordnet. Ist die Trennung von zwei miteinander verbundenen Bauteilen nicht erforderlich, so werden die entsprechenden Verbindungselemente im Demontagemodell mit „kein Zwang“ gekennzeichnet. Das Ergebnis der Demontageanalyse ist die vollständige Beschreibung der Demontageprozesse hinsichtlich Demontagezeiten, -werkzeugen, Vorrang-, Zwang-Beziehungen sowie deren Abbildung im Demontagemodell.

Die Ermittlung der Recyclingdaten erfolgt gemäß dem Aufbau des Recyclingmodelles (siehe Kapitel 5.4.3). Die Informationen werden anhand von Angaben der Zuliefererindustrie und den entsprechenden Recyclingbetrieben (z.B. aus den Werkstattentsorgungs-Systemen) übernommen. Für neuartige Bauteil-/ Werkstoffkonzepte sind diese Angaben im Rahmen der Entwicklungsphase zu ermitteln. Dabei werden durch Vorversuche die möglichen Recyclingstoffströme ermittelt und im Planungsinstrument dokumentiert.

Nach der Simulation der Demontage- und Recyclingmöglichkeiten werden die Ergebnisse im Bewertungsmodul mit den Zielsetzungen abgeglichen und weitere Optimierungsmöglichkeiten seitens Produkt und Prozess verifiziert. Als Abschluss wird das Demontage- und Verwertungskonzept dokumentiert.

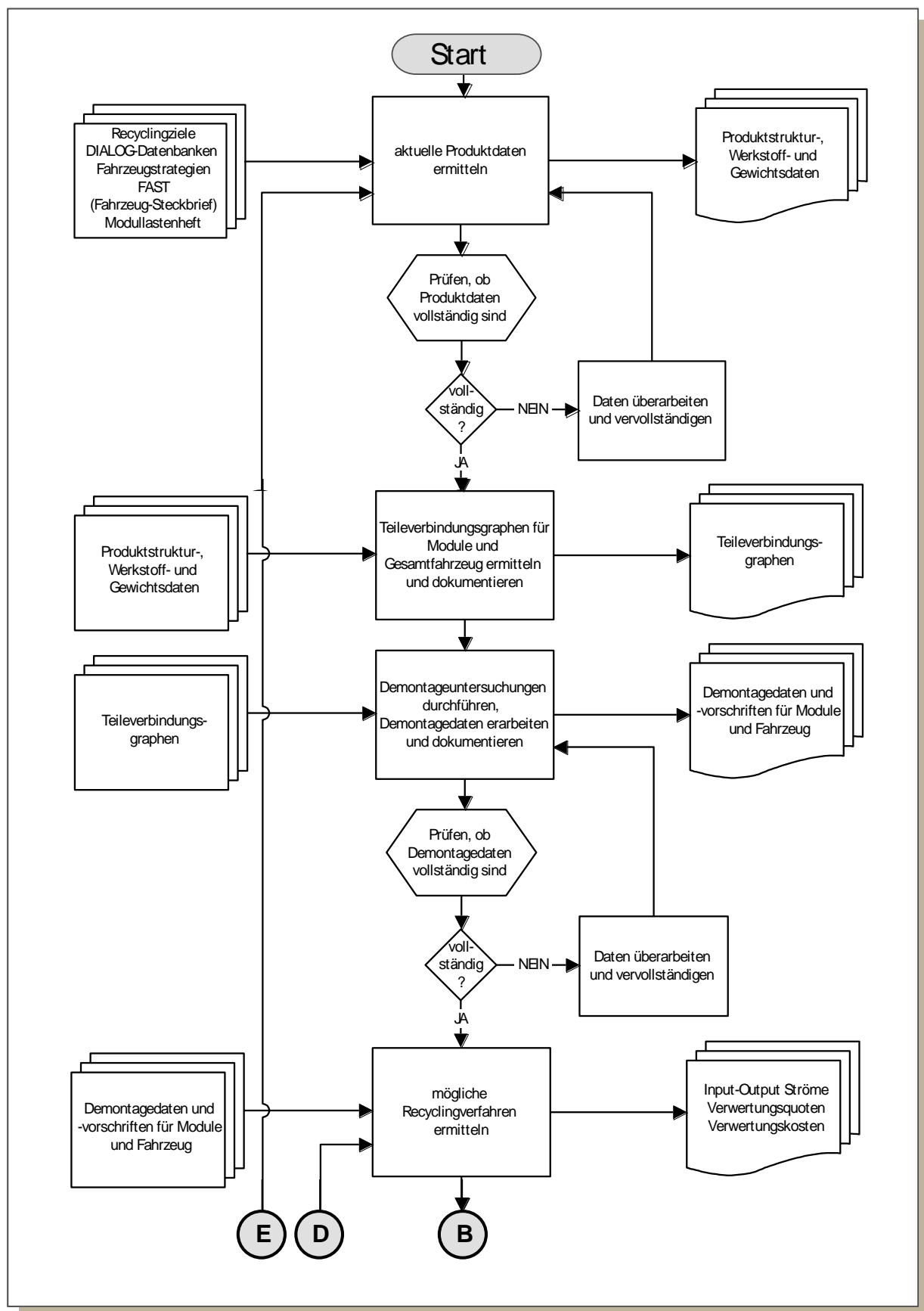


Abbildung 5.30/1: Verfahrensablauf zur Erstellung eines Verwertungskonzeptes

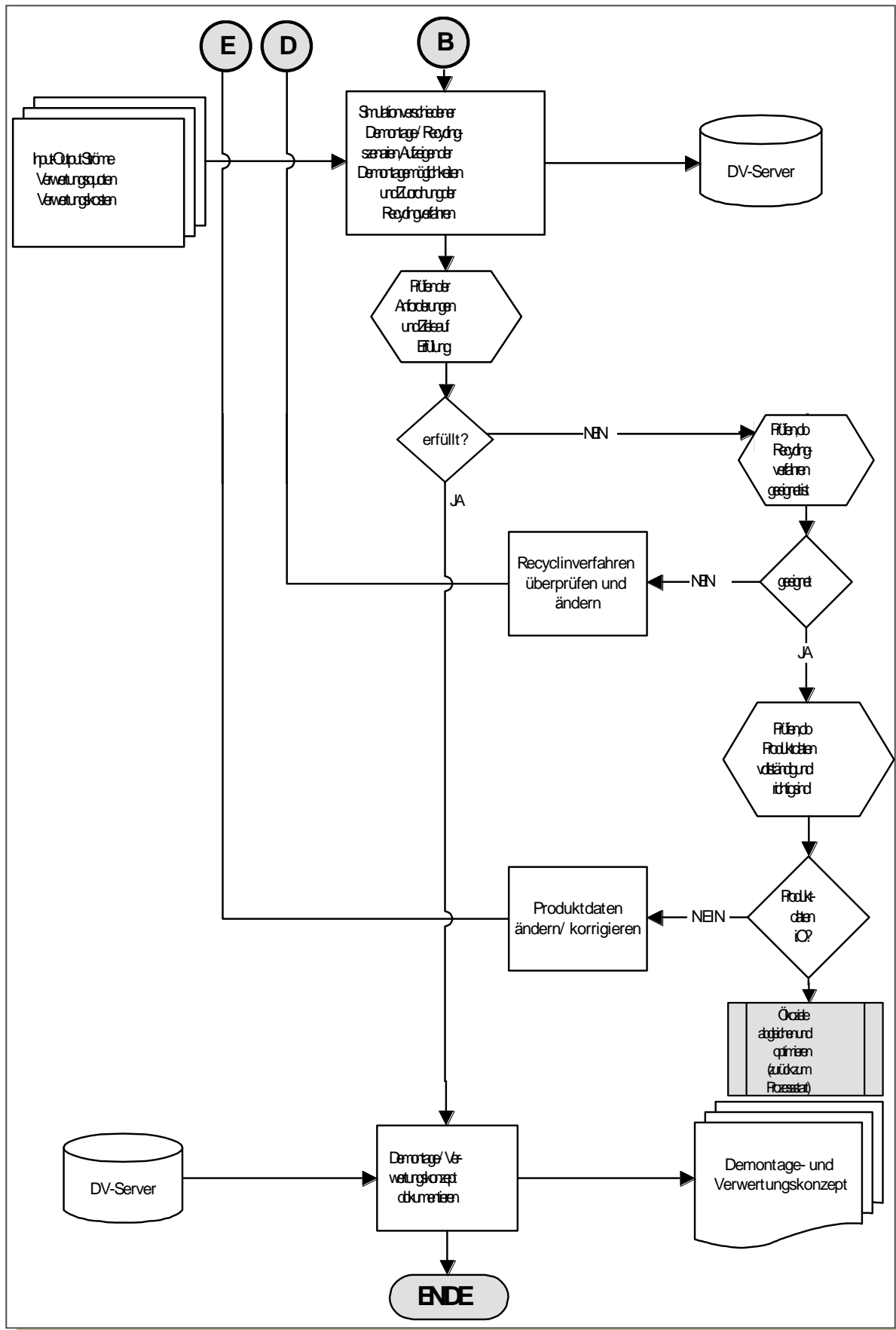


Abbildung 5.30/2: Verfahrensablauf zur Erstellung eines Verwertungskonzeptes

5.5 Organisation der recyclingintegrierten Fahrzeugentwicklung

Gegenstand der Aufbauorganisation ist die Festlegung und Abgrenzung von Aufgaben, Verantwortung und Befugnissen aller Prozessbeteiligten der recyclinggerechten Produktentwicklung. Dabei gilt es, unter optimaler Ausnutzung der Ressourcen eine durchgängige Bereitstellung des notwendigen Recyclingwissens in mehreren, teilweise parallel laufenden Fahrzeugprojekten sicherzustellen.

Der Ausgangspunkt für die Festlegung der Organisationsform ist die Strukturierung der im Rahmen der vorgestellten Planungsmethodik definierten Aufgabenpakete. Abbildung 5.31 zeigt eine Übersicht der beschriebenen Arbeitsinhalte entlang des Entwicklungsprozesses und ordnet sie den einzelnen Organisationseinheiten eines Unternehmens zu.

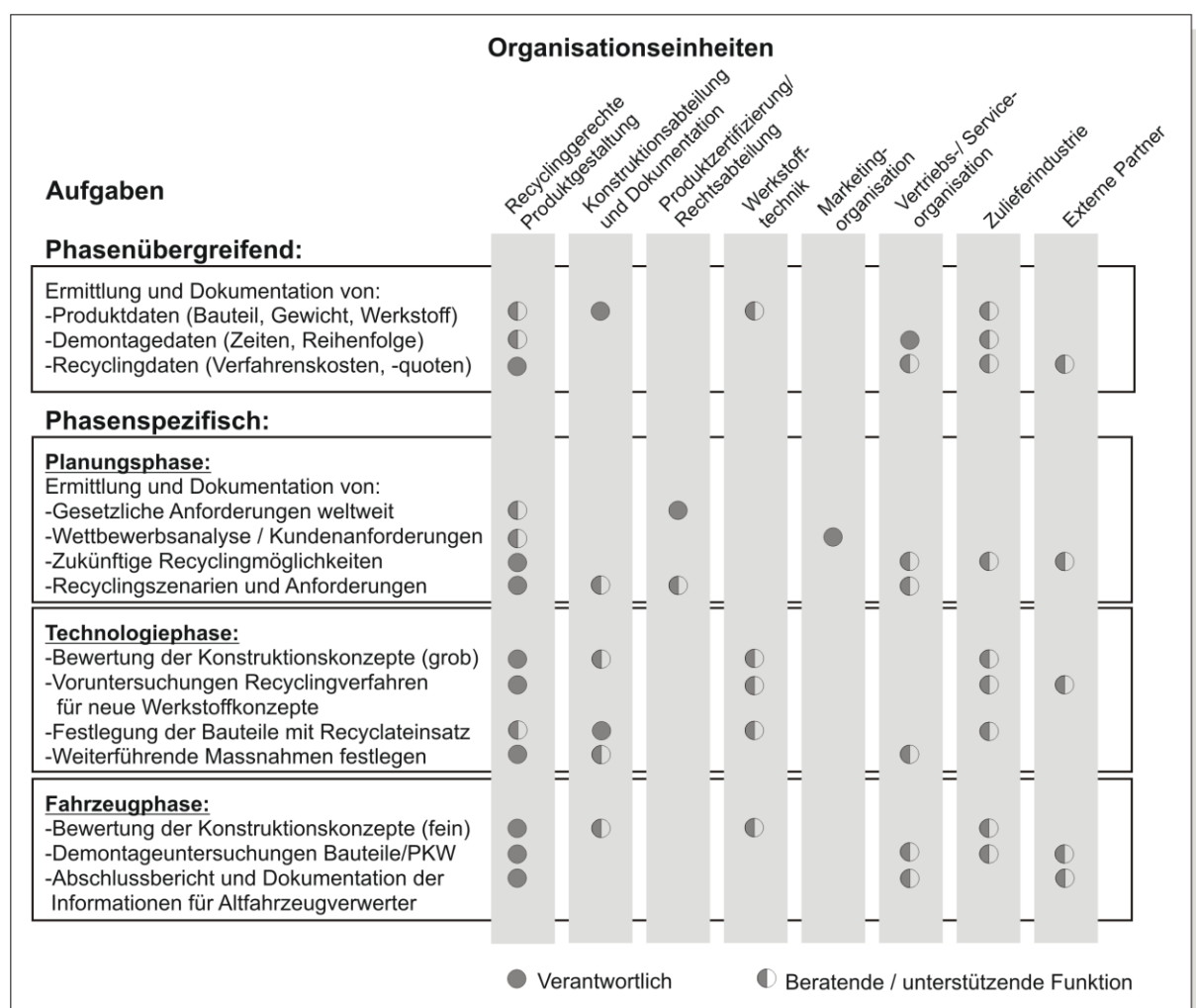


Abbildung 5.31: Projektaufgaben nach Zuständigkeit und Verantwortung

Prinzipiell lassen sich die einzelnen Aufgaben der recyclinggerechten Produktentwicklung in phasenübergreifende und phasenspezifische Aufgaben untergliedern.

Die phasenübergreifenden Aufgaben beinhalten die Ermittlung der Produkt-, Demontage- und Recyclingdaten sowie deren ständige Aktualisierung entsprechend dem Entwicklungsfortschritt. Die beteiligten Bereiche sind die Bauteilverantwortlichen aus Konstruktion und Dokumentation, die Werkstofftechnik, die Service-/Vertriebsorganisation, die Zuliefererindustrie sowie eine zentrale Fachabteilung Recyclinggerechte Produktgestaltung innerhalb der Entwicklungsorganisation.

Der Konstrukteur ist gemeinsam mit den Zulieferern und der Werkstofftechnik für die Dokumentation der Produkt-, Gewichts- und Werkstoffinformationen in den entsprechenden Stücklistensystemen verantwortlich. Die Zuordnung der Werkstoffdaten zu den Bauteilen bildet dabei eine wichtige Planungsgrundlage für die Festlegung des Recyclingkonzeptes. Die Ermittlung der Demontagedaten für die Produkte erfolgt durch die Service-Organisation, welche im Sinne der servicegerechten Produktgestaltung, bereits fester Bestandteil der Entwicklungsprojekte ist. Zusätzlich ist jedoch eine Anpassung der Demontagedaten an die Gegebenheiten der Altfahrzeugverwertung durch den Fachbereich Recyclinggerechte Produktgestaltung durchzuführen. Die Ermittlung und Dokumentation der Recyclingverfahren erfolgt in Zusammenarbeit mit der Vertriebsorganisation. Diese stellt über die jeweiligen Länderorganisationen die Schnittstelle zu den nationalen Altfahrzeugverwertungs Betrieben dar und koordiniert weltweit die Aktivitäten zum Aufbau der Altfahrzeugrücknahme-Systeme. In der Fachabteilung Recyclinggerechte Produktgestaltung werden alle ermittelten Daten gebündelt und im Planungsinstrument SIDORA modelliert.

Die phasenspezifischen Aufgaben lassen sich entlang des Entwicklungsprozesses wie folgt gliedern:

In der Produktplanung werden die Haupteinflussfaktoren der Altfahrzeugverwertung analysiert und zukünftige Recyclingszenarien gebildet. Ein Schwerpunkt ist die Prüfung der weltweiten gesetzlichen Anforderungen an das Fahrzeug-Recycling durch die Produkt-Zertifizierung. Der Marketingbereich führt innerhalb der Planungsphase eine Wettbewerbsanalyse durch und ermittelt die Kundenanforderungen an ein umwelt- und recyclinggerechtes Fahrzeug. In der Fachabteilung Recycling-

gerechte Produktgestaltung werden gemeinsam mit dem Vertrieb und ggf. externen Partnern die zukünftigen Recyclingmöglichkeiten ermittelt und bewertet. Der Transfer der Szenarien und die Ableitung von Anforderungen an die recyclinggerechte Produktgestaltung erfolgt mit allen beteiligten Bereichen und schließt die Aktivitäten der Planungsphase ab.

In der Technologiephase werden die einzelnen Konstruktionskonzepte (Varianten-Anpassungs- und Neukonstruktion) in Zusammenarbeit mit den Konstruktionsabteilungen analysiert und Maßnahmen zur Entwicklung alternativer Lösungsmöglichkeiten erarbeitet. Für neuartige Werkstoffkonzepte werden gemeinsam mit externen Partnern erste Voruntersuchungen zu neuen Recyclingtechnologien vorgenommen. Des Weiteren werden die Bauteile für den Einsatz von Recyclatwerkstoffen gemeinsam mit der Werkstofftechnik festgeschrieben.

In der Fahrzeugphase werden detaillierte Analysen der Bauteileigenschaften, Verbindungstechniken und Materialeigenschaften von Einzelteilen für relevante Bauteile durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt werden u.a. Demontageuntersuchungen anhand ausgewählter Prototypen gemeinsam mit dem Servicebereich durchgeführt. Im Abschlußbericht werden das endgültige Demontage- und Recyclingkonzept, sowie spezielle Neuerungen für die Umweltkommunikation zusammengefasst und an die Altfahrzeugverwertungs-Betriebe weitergeleitet.

Organisatorisch sind die beschriebenen Aufgaben und Verantwortungen zur recyclinggerechten Produktgestaltung fester Bestandteil jedes Fahrzeugentwicklungsprojektes (siehe Abbildung 5.32). Unter der Gesamtprojektleitung sind Verantwortliche für Entwicklung, Produktion, Einkauf, Vertrieb und andere Aufgaben benannt. Entsprechend den wichtigsten Baugruppen und Funktionen eines Fahrzeuges gibt es Entwicklungsteams (z.B. Rohbau, Antrieb, Innenausstattung, usw.) und Teams mit Querschnittsaufgaben (z.B. Qualitätsmanagement, Projektmanagement, usw.).

Eines dieser Querschnittsteams ist das so genannte Recyclingteam. Es setzt sich zusammen mit Fachleuten aus den Bereichen Recyclinggerechte Produktgestaltung, Werkstofftechnik, Service, Marketing, Zertifizierung sowie Konstruktion und Vertrieb. Jedes Mitglied des Recyclingteams ist gleichzeitig in einem Entwicklungsteam als Verantwortlicher für alle recyclingbezogenen Fragestellungen und Aufgaben

vertreten. Dadurch wird eine vollständige Einbindung des Prozesses zur recyclinggerechten Produktgestaltung in das Fahrzeugentwicklungsprojekt sichergestellt. Die Aufgaben der Mitglieder bestehen darin, die Zielsetzungen aus Recyclingsicht für die einzelnen Fahrzeugmodule zu definieren, zu kontrollieren und ggf. Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. In regelmäßigen Teamsitzungen wird der aktuelle Stand bewertet und an die Projektleitung weitergeleitet.

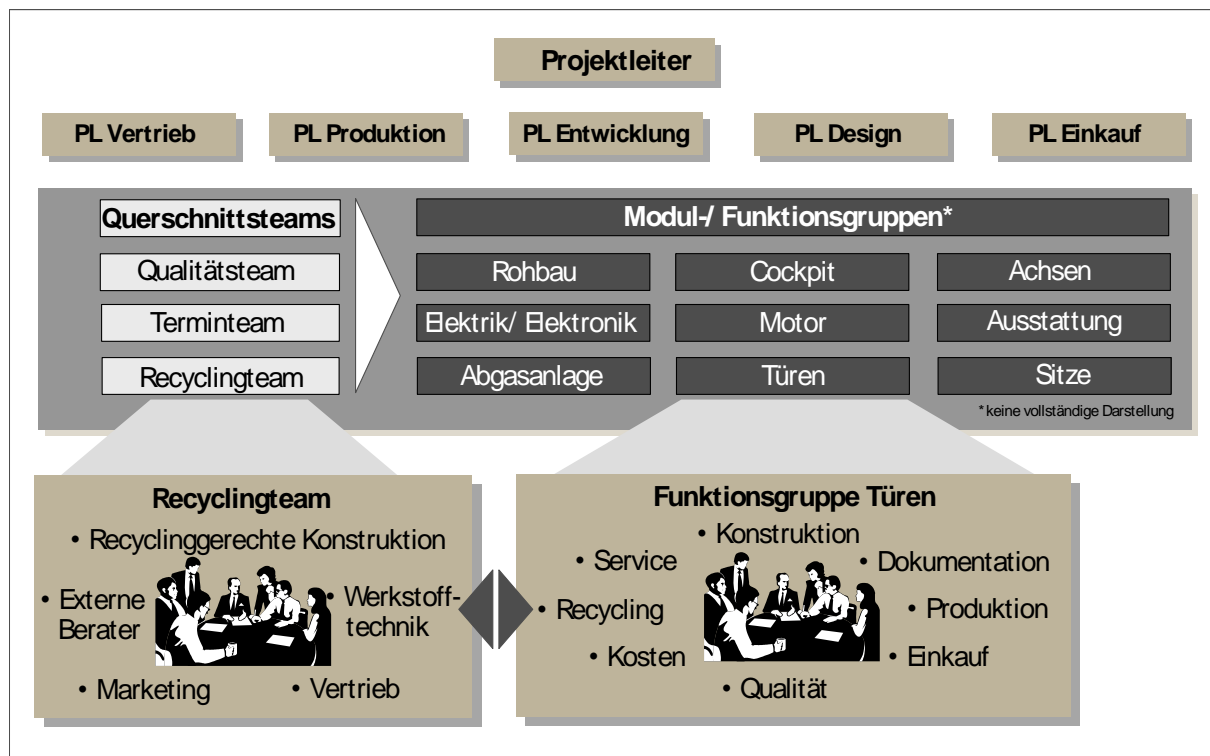


Abbildung 5.32 Einbindung des Recyclingteams in die PKW-Projektorganisation

Durch das Einsetzen des Recyclingteams als fester Bestandteil der Fahrzeug-Projektorganisation kann somit den Zielen einer Nutzung des Recyclingwissens in mehreren teilweise parallel laufenden Fahrzeugprojekten Rechnung getragen werden. Die Zusammensetzung des Teams richtet sich dabei im Wesentlichen nach dem zeitlichen und inhaltlichen Projektverlauf (siehe Abbildung 5.27) sowie der entsprechenden Einbindung von Mitarbeitern unterschiedlicher Bereiche.

Zu Beginn sind im Sinne eines Planungsteams zur Festlegung der Entwicklungsziele vor allem Mitarbeiter aus Marketing und Vertrieb involviert, technische Fachrichtungen wie Werkstofftechnik oder Konstruktion bringen vor allem ihr Realisierungs- Know-how ein. Im weiteren Verlauf setzt sich das Recyclingteam hauptsächlich aus Mitarbeitern der Recyclinggerechten Produktgestaltung,

Konstruktion, Werkstofftechnik und Vertrieb zusammen. Durch die Vergabe von gesamten Entwicklungsumfängen an sogenannte Systempartner kommt der Einbindung dieser Lieferanten in das Recyclingteam eine besondere Bedeutung zu. Die Systempartner sind neben der Entwicklung auch für die Fertigung und Recyclingplanung der jeweiligen Baugruppen verantwortlich. Sie sind deshalb bereits möglichst früh in den Entwicklungsprozess zu integrieren, um schon hier das externe Know-how zu nutzen.

Durch die Integration der recyclinggerechten Produktgestaltung in die Aufbauorganisation der Entwicklungsprojekte ist sichergestellt, dass Recyclingaspekte nicht erst bei Markteinführung gesucht, sondern bereits im frühesten Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Entsprechende Zielsetzungen werden rechtzeitig abgestimmt und zu den jeweiligen Quality Gates im Entwicklungsprozess überprüft. Aus den Zwischenergebnissen werden dann die weiteren Handlungsbedarfe bis zum nächsten Quality Gate abgeleitet und durch Mitarbeit in den Entwicklungsteams umgesetzt.

6 Anwendungsbeispiel Mittelklasse PKW

Ziel dieses Kapitels ist es, die beschriebene Planungsmethodik und die Funktionalität des Softwaretools SIDORA zu überprüfen und anhand eines Anwendungsbeispiels zu erläutern. Hierzu werden die recyclingbezogenen Aktivitäten entlang des Entwicklungsprozesses für einen Mittelklasse PKW aufgezeigt. Im Rahmen der Planungsphase werden anhand des aktuellen Fahrzeugtyps mögliche zukünftige Recyclingszenarien beschrieben, deren Auswirkungen quantifiziert und die daraus resultierenden Anforderungen für die weiteren Entwicklungsphasen abgeleitet. Ausgehend von den definierten Zielsetzungen werden innerhalb der Technologiephase die Auswirkungen von unterschiedlichen neuen Konstruktionskonzepten auf das Recyclingkonzept des Fahrzeuges verifiziert. Dabei werden neben der Bewertung der einzelnen Konzeptalternativen auch die Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugmodulen aufgezeigt. In der Fahrzeugphase werden die Konstruktionskonzepte präzisiert und das endgültige Recyclingkonzept des Fahrzeuges festgelegt.

6.1 Planungsphase

Der Ausgangspunkt für die Ermittlung der unterschiedlichen Recyclingszenarien stellt die Analyse der aktuellen Situation bei der Altfahrzeugverwertung dar. Als erster Schritt wird dabei das aktuelle Fahrzeugkonzept gemäß dem Aufbau des Produktmodelles im Planungsinstrument SIDORA abgebildet. Die Gewichts- und Werkstoffangaben für den Vorgängertyp werden auf Basis der Produkt-Stückliste ermittelt und anhand von Demontageuntersuchungen verifiziert. Für die Bestimmung der Recyclingquote wird das Gewicht nach EG 92/21 (ohne Fahrer und Gepäck, 90% Tankbefüllung) zu Grunde gelegt.

Der aktuelle Mittelklasse Fahrzeugtyp (Baujahr 2000) ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil von Stahl und Eisen mit ca. 64 Prozent am Gesamtgewicht des PKW. Der Leichtmetallanteil (dominiert von Aluminium) beträgt ca. 7 Prozent des Gewichtes. Die Einsatzgebiete sind überwiegend im Bereich Fahrwerk und Motor. Der Kunststoffanteil liegt bei 16 Prozent. Den größten Anteil bei den Kunststoffen tragen die Thermoplaste mit ca. 10 Prozent des Gesamtfahrzeuggewichtes. Die Betriebsstoffe umfassen alle Öle, Kraftstoffe, Kühlflüssigkeit, Kältemittel, Bremsflüssigkeit und Waschwasser. Zur Gruppe sonstige Werkstoffe gehören die

Textilien, Naturfasern sowie die Elektrik- und Elektronikkomponenten. Die Fahrzeugverkabelung und die Batterie wurden gemäß ihrer Werkstoffzusammensetzung zugeordnet. Abbildung 6.1 zeigt die Werkstoffzusammensetzung der gewählten Fahrzeugvariante nach VDA 231-106 /VDA 97/.

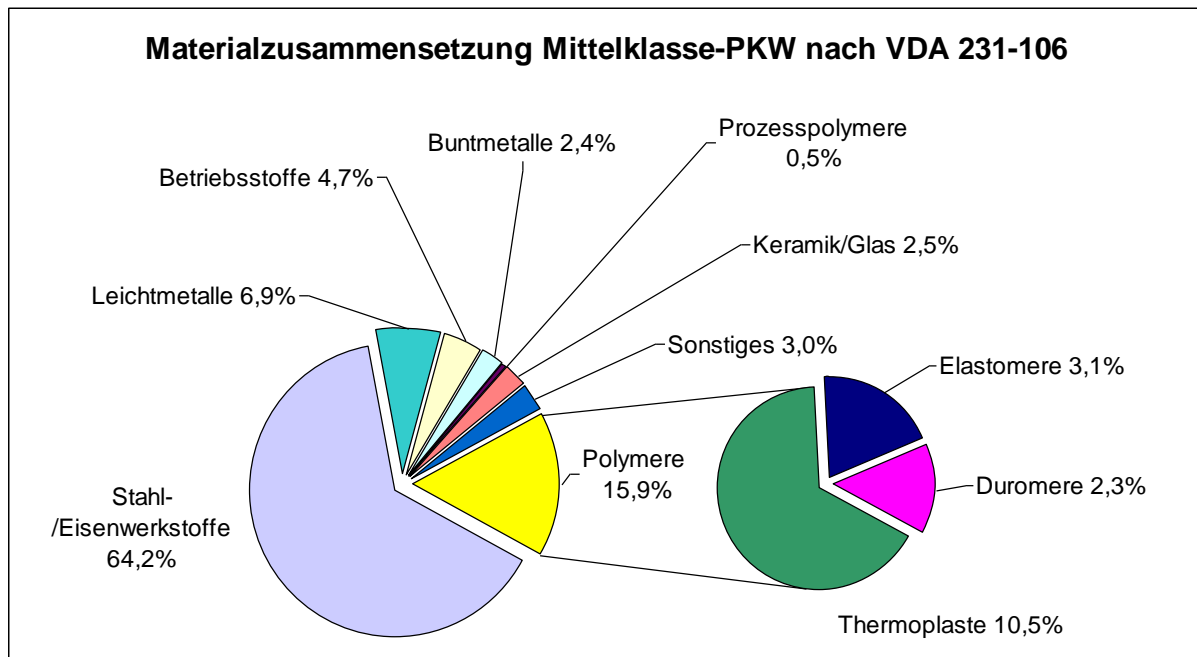


Abbildung 6.1: Materialzusammensetzung Mittelklasse PKW Baujahr 2000

Ausgehend von den beschriebenen Fahrzeugdaten werden im zweiten Schritt die zukünftigen Recyclingmöglichkeiten des Fahrzeuges analysiert. Am Beispiel von vier unterschiedlichen Recyclingszenarien werden die Auswirkungen für das Fahrzeug aufgezeigt. Folgende Szenarien werden für das Anwendungsbeispiel definiert:

Szenario 1 stellt die heutige Situation der Altfahrzeugverwertung im Sinne eines Basiszenario dar. Dabei werden die Demontagepflichtumfänge gemäß Anhang 2 der Altfahrzeugrichtlinie durchgeführt. Dies beinhaltet die Trockenlegung des Fahrzeuges (Entnahme von Kraftstoff, Kühlflüssigkeit, Bremsflüssigkeit, Scheibenwaschwasser, Kältemittel aus Klimaanlage Motor-, Getriebe- und Differentialöl) sowie die Entfernung der Batterie, Front-, Heck- und Seitenscheiben, der Räder und Airbags. Der Rest des Fahrzeuges wird anschließend paketierrt und geshreddert. Die metallischen Werkstoffe werden verwertet, die Shredderleichtfraktion wird deponiert.

Innerhalb Szenario 2 wird -analog Szenario 1- zunächst der Demontagepflichtumfang durchgeführt. Für die Nachbehandlung der Shredderleichtfraktion wird eine

energetische Verwertungstechnologie der organischen Bestandteile zu Grunde gelegt. Dabei können verschiedene Verfahren wie beispielsweise Einsatz in Müllheizkraftwerken oder Einbringung in die Zementindustrie zum Einsatz kommen /DRE 98, THE 02/. Die Fahrzeuge müssen innerhalb Szenario 2 die Zielsetzungen der Altfahrzeug Gesetzgebung von 85 Gew. % stofflich und 10 % energetisch erfüllen.

Szenario 3 beinhaltet neben der energetischen Verwertung auch eine stoffliche Verwertung der organischen Bestandteile der Shredderleichtfraktion. Entsprechende Technologien befinden sich derzeit im Aufbau /FRA 01, VW 02/ oder werden bereits heute für andere Abfallströme eingesetzt /OBE 02/. Innerhalb Szenario 3 kommen diese Verfahren für die Hälfte der organischen Bestandteile der Shredderleichtfraktion zum Einsatz. Die Erfüllung der Zielsetzungen gemäß Altfahrzeug-Richtlinie ist entsprechend Szenario 2 sicherzustellen.

Szenario 4 basiert auf den Technologien von Szenario 1. Im Gegensatz zu Szenario 1 sind jedoch die Zielsetzungen gemäß Altfahrzeugrichtlinie sicherzustellen. Um die Ziele zu erreichen kommen verstärkt materialbezogene Recyclingtechnologien zum Einsatz. Abbildung 6.2 zeigt eine Übersicht der 4 Recyclingszenarien.

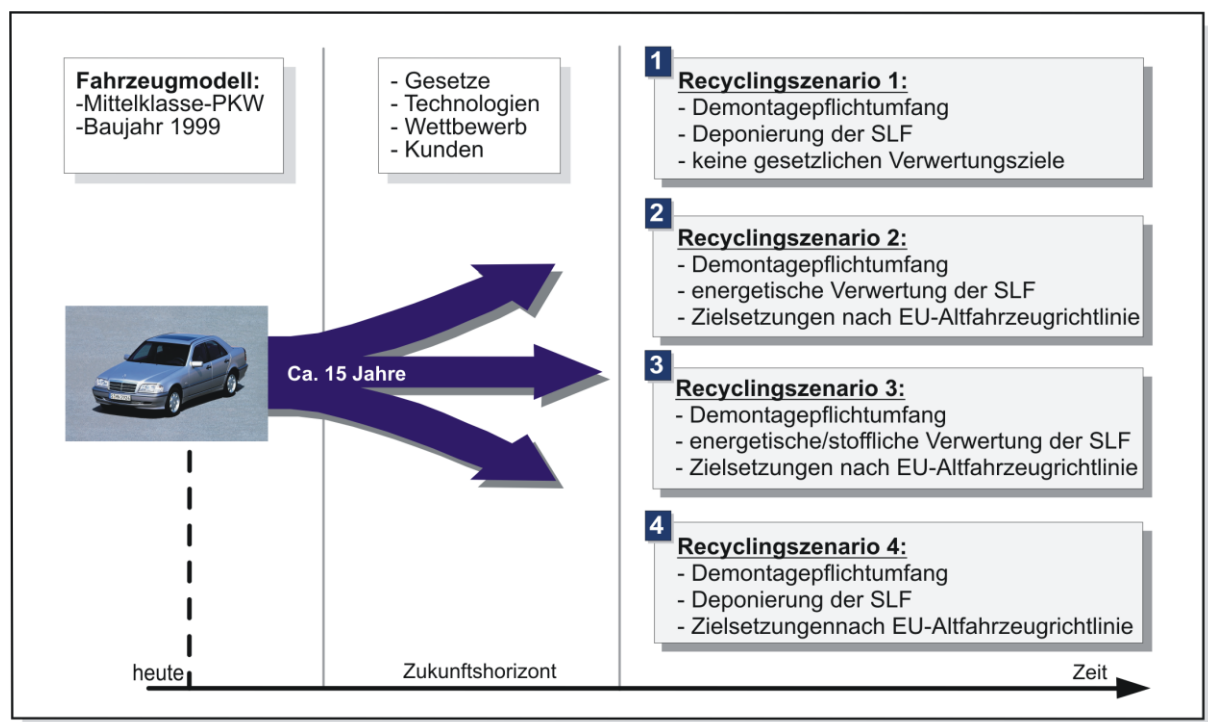


Abbildung 6.2: Recyclingszenarien am Beispiel eines Mittelklasse PKW

Aus den Ergebnissen der einzelnen Recyclingszenarien können für die aktuelle Fahrzeugvariante Rückschlüsse für das optimale Recyclingszenario in Bezug auf Recyclingerlöse und erreichbarer Recyclingquoten gewonnen werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigt Abbildung 6.3.

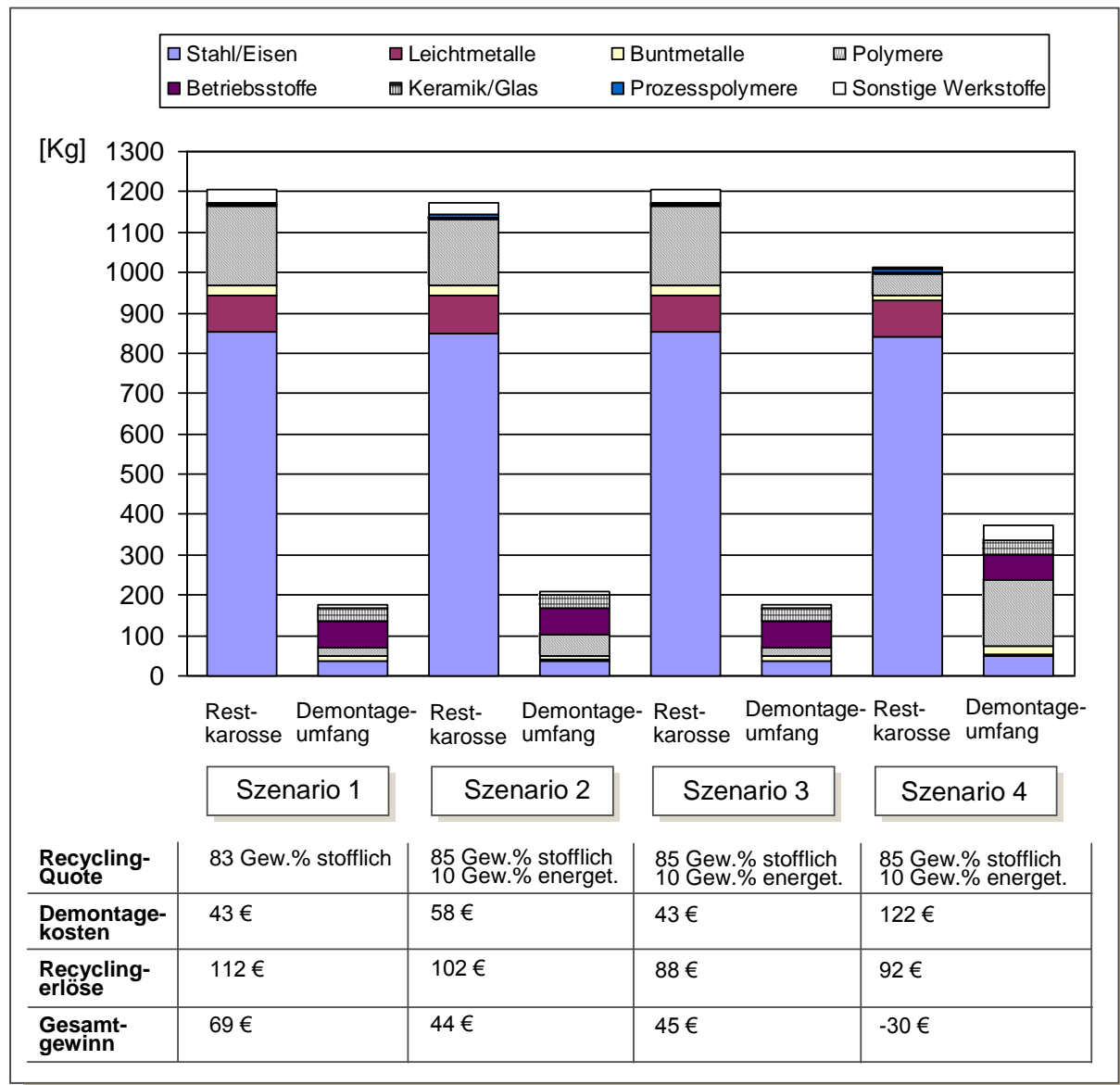


Abbildung 6.3. Ergebnisse der Recyclingszenarien für den Mittelklasse-PKW

Das Fahrzeugkonzept erreicht innerhalb Szenario 1 den höchsten Gesamtgewinn mit 69 €. Der Demontagepflichtumfang beträgt in Summe 177 kg. Die notwendige Demontagezeit beträgt 85 Minuten. Mit der Demontage des beschriebenen Pflichtumfangs wird jedoch lediglich eine stoffliche Verwertungsquote von 83 Gew.% erreicht.

Szenario 2 und 3 weisen einen nahezu identischen Gesamtgewinn in Höhe von 45 € zur Erfüllung der Zielsetzungen von 85% stofflicher und 10% energetischer Verwertung auf. Innerhalb Szenario 2 ist zur Erfüllung der Recyclingziele ein Demontageumfang von 210 kg notwendig. Neben dem Demontage-Pflichtumfang sind zusätzlich 30 kg Kunststoff-Bauteile zu demontieren und stofflich zu verwerten. Dies wird erreicht durch Demontage von ca. 26 kg Kunststoffbauteile im Modul Anbauteile Außen (Stossfänger, Verkleidung Motorraum, Seitenschweller) und von ca. 4 kg im Modul Interieur (A/B-Säulenverkleidungen, Einstiegsschienen). Die Demontagekosten betragen in Summe 58 €. Die Recyclingerlöse innerhalb Szenario 2 sind mit 103 € aufgrund der günstigeren Kosten für die energetische Verwertung der Shredderleichtfraktion im Vergleich zu Szenario 3 um 14 € höher. Innerhalb Szenario 3 werden zur Erfüllung der Zielsetzungen lediglich die Demontage-Pflichtumfänge entnommen. Mit der teilweise stofflichen Aufbereitung der Shredderleichtfraktion können die Gesamtfahrzeug-Ziele erreicht werden.

Innerhalb Szenario 4 lassen sich die Verwertungsziele von 95 Gew.% zwar erfüllen. Aufgrund des hohen Demontageanteils von 372 kg (davon 163 kg Polymere) ergibt sich jedoch in Summe ein Verlust von ca. 30 € für das Gesamtfahrzeug. Die erzielbaren Recyclinggewinne betragen 92 €, die Demontagekosten 122 €.

Fazit:

Unter Berücksichtigung der heutigen Situation der Altfahrzeugverwertung im Sinne Szenario 1 lassen sich die Zielsetzungen der Altfahrzeugrichtlinie für das Jahr 2015 nicht erreichen. Innerhalb Szenario 4 können ohne eine Aufbereitung der organischen Bestandteile der Shredderleichtfraktion die Ziele zwar erfüllt werden, es ist jedoch ein hoher Demontageaufwand notwendig. Die Folge ist, eine erhebliche Verschlechterung der wirtschaftlichen Situation der Altfahrzeugverwertung.

Mit der Verwertung der organischen Bestandteile der Shredderleichtfraktion innerhalb Szenarien 2 und 3 kann die wirtschaftliche Situation zur Erfüllung der Zielsetzungen gemäß Altfahrzeugverordnung im Vergleich zu Szenario 4 wesentlich verbessert werden. Zwischen den Szenarien ergeben sich dabei aus finanzieller Sicht keine wesentlichen Unterschiede. Während bei Szenario 2 zur Erfüllung der Ziele zusätzlich ca. 30 kg Kunststoff-Bauteile demontiert werden müssen, können diese innerhalb Szenario 3 unter Berücksichtigung neuer Recyclingtechnologien für die organischen Bestandteile der SLF stofflich verwertet werden.

Ausgehend von den durchgeführten Analysen auf Gesamtfahrzeug-Ebene können folgende Anforderungen und Rahmenbedingungen für die weiteren Entwicklungsphasen des Fahrzeuges im Rahmen des Anwendungsbeispiels festgelegt werden.

- ❑ Erfüllung der Zielsetzungen gemäß Altfahrzeugrichtlinie unter den Rahmenbedingungen von Szenario 2. Dazu:
- ❑ Berücksichtigung einer demontage- und recyclinggerechten Produktgestaltung (Materialauswahl, Verbindungstechnik, Baustruktur) für ca. 30 kg Kunststoffbauteile auf Basis der Werkstoffverteilung des Vorgängertyps.
- ❑ Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Reduzierung der Demontagezeiten für die Demontage-Pflichtumfänge (Trockenlegung, Glas, Airbags, etc.,).
- ❑ Vermehrter Einsatz von Sekundärkunststoffen um den Aufbau wirtschaftlicher Verwertungsverfahren zu unterstützen.

6.2 Technologiephase

Ausgehend von den definierten Zielsetzungen und Anforderungen werden in der Technologiephase Lösungsmöglichkeiten für die einzelnen Module des Fahrzeuges erarbeitet und zur Serientauglichkeit entwickelt. Die Aufgabe aus Recyclingsicht ist es für die einzelnen Konstruktionslösungen mögliche Recyclingkonzepte zu ermitteln und hinsichtlich den geforderten Zielsetzungen und Anforderungen zu bewerten. Neben der Bewertung von einzelnen Konstruktionslösungen müssen gleichzeitig die Auswirkungen der Module auf das Gesamtfahrzeugkonzept beachtet werden. Hierzu ist ein ständiger Abgleich zwischen den einzelnen Fahrzeug-Modulen erforderlich.

Im Rahmen des Anwendungsbeispiels sollen innerhalb der Technologiephase drei verschiedenen Fahrzeugkonzepte untersucht werden. Neben der Fahrzeugvariante 1, welches im Wesentlichen eine Weiterentwicklung des Vorgängertyps darstellt, sollen noch zwei Leichtbaukonzepte (Variante 2 und 3) in der Technologiephase untersucht werden.

Der Entwicklungsschwerpunkt in dieser frühen Phase liegt zunächst auf den markanten Änderungspunkten des Fahrzeuges. Dementsprechend unterscheiden sich die Fahrzeugvarianten vor allem durch ihre unterschiedlichen Rohbaukonzepte. Um dennoch eine Aussage über die Recyclingfähigkeit des Gesamtfahrzeuges treffen zu können, werden die restlichen Umfänge aus dem Vorgängermodell

übernommen, angepasst und in das Gesamtfahrzeugkonzept integriert. Abbildung 6.4 zeigt die Materialzusammensetzung der unterschiedlichen Fahrzeugvarianten.

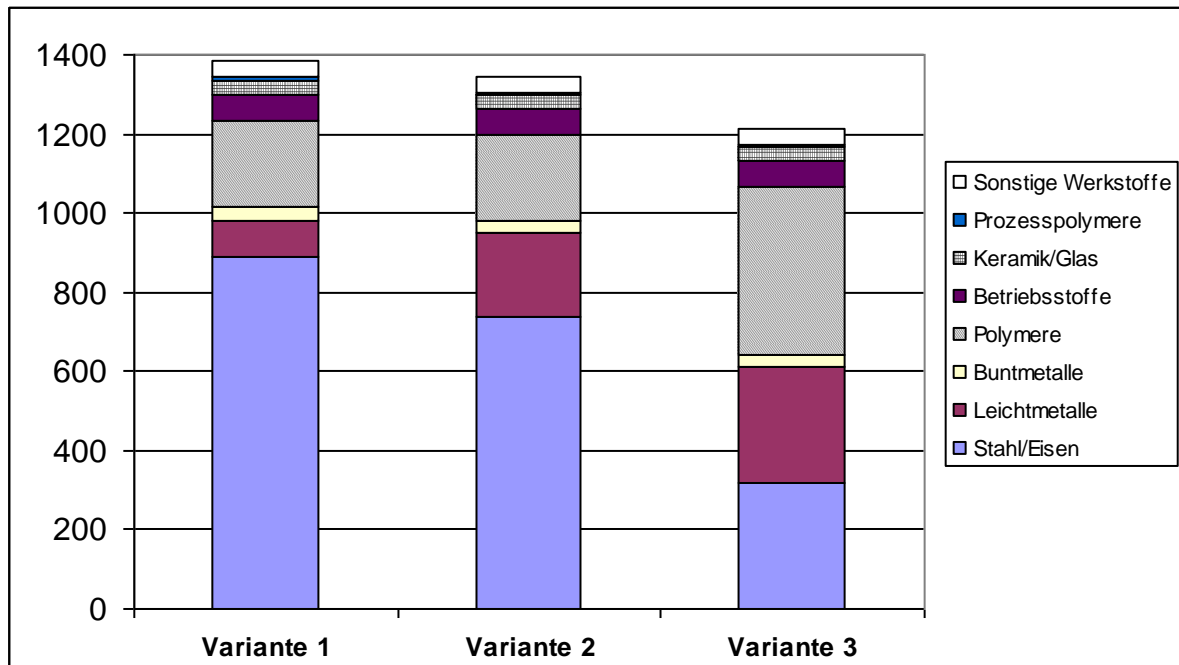


Abbildung 6.4. Materialzusammensetzung der Fahrzeugkonzepte

Der Hauptunterschied von Variante 1 im Vergleich zu den Leichtbaukonzepten ist der Anteil an Aluminium, Kunststoffen bzw. Stahl/Eisen in der Werkstoffaufteilung. Fahrzeug-Variante 2 weist im Vergleich zur Basisvariante ein leicht geringeres Gesamtgewicht auf. Die Einsparungen werden vor allem durch den Einsatz von Leichtmetallen erzielt, welche einen Anteil von 16% am Gesamtfahrzeuggewicht haben. Die Einsatzgebiete sind überwiegend im Bereich Vorbau, Dach, Motorhaube, Heckdeckel und Kotflügel.

A: Auswertungen Gesamtfahrzeug:

Fahrzeug-Variante 3 weist im Vergleich zum Basisfahrzeug ein Mindergewicht von ca. 170 kg auf. Der Anteil von Stahl und Eisen beträgt lediglich 26 Prozent des Gesamtfahrzeuggewichtes. Die größte Materialfraktion sind die Kunststoffe mit 34 Prozent am Gesamtfahrzeuggewicht. Neben den Außenanwendungen wie Kotflügel, Heckdeckel und Dach sind bei der Fahrzeug-Variante 3 ebenso Teile des Rohbaus (Unterbau, Rückwand, Boden) durch Kunststoffe ersetzt. Diese Materialkonzepte kommen derzeit lediglich in Kleinserien zum Einsatz und stellen somit im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen eine Art Extremszenario dar /DC 03/.

Der Vergleich der Fahrzeugvarianten erfolgt innerhalb den Rahmenbedingungen von Recyclingszenario 2. Aus diesem Vergleich können Rückschlüsse auf die Materialauswahl zur Erreichung der Recyclingziele getroffen werden. Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse für die jeweiligen Fahrzeugvarianten.

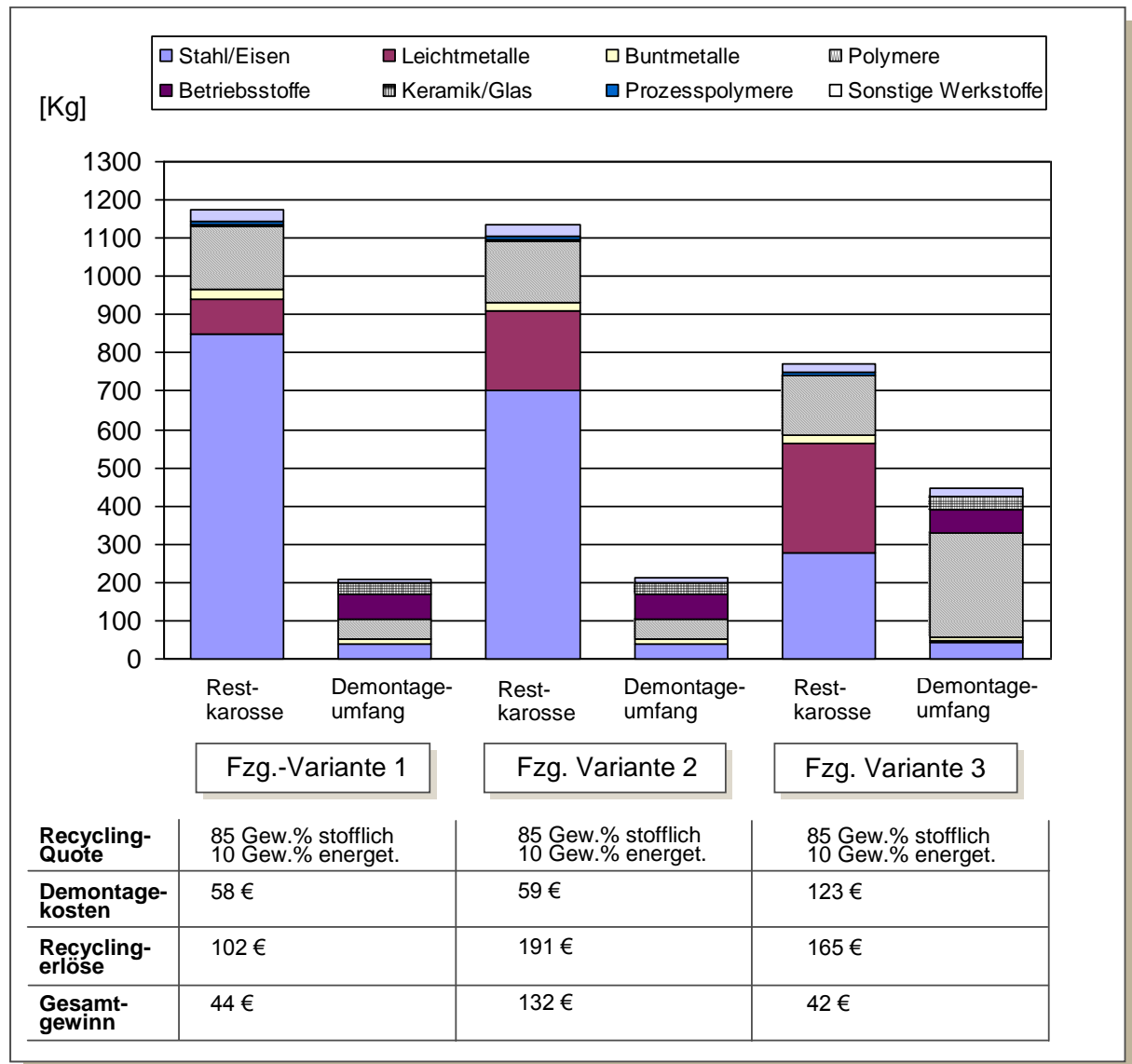


Abbildung 6.5: Ergebnisse Recyclingszenario 2 für die drei Fahrzeugkonzepte

Bei der Fahrzeugvariante 2 erhöht sich der Gesamtgewinn zur Erfüllung der gesetzlichen Ziele auf 132 €. Die Recyclingerlöse resultieren vor allem aus dem hohen Aluminiumanteil des Fahrzeuges. Neben dem Demontagepflichtumfang müssen 30,5 kg Kunststoff-Bauteile zusätzlich demontiert und stofflich verwertet werden. Die Demontagekosten betragen 59 €. Bei der Fahrzeugvariante 3 müssen unter Berücksichtigung einer energetischen Verwertung der organischen

Bestandteile der Shredderleichtfraktion neben dem Demontage-Pflichtumfang zusätzlich 268 kg demontiert werden. Um diesen Mehrumfang zu realisieren müssen neben den Kunststoffbauteilen aus dem Bereich Anbauteile außen, Sitze und Interieur auch die im Rohbau eingesetzten Kunststoffe nahezu vollständig demontiert werden. Die hierfür notwendige Demontagezeit beträgt in Summe ca. vier Stunden. Die Recyclerlöse betragen bedingt durch den hohen Aluminiumanteil der Restkarosse 165 €. Der Gesamtgewinn reduziert sich im Vergleich zur Fahrzeugvariante 2 um 90 €.

B: Auswertungen Fahrzeugmodule:

Die Ermittlung des zusätzlichen Demontageumfangs für die einzelnen Fahrzeugvarianten erfolgt durch Simulation der einzelnen Demontage- und Recyclingmöglichkeiten der Fahrzeugmodule. Zur Erläuterung der Berechnungen werden die Ergebnisse auf Modul-Ebene dargestellt. Abbildung 6.6 zeigt die Unterschiede der einzelnen Demontagemodule nach dem jeweiligen Gewicht und der im Rahmen von Szenario 2 verwertbaren stofflichen Menge für die Haupt-Änderungspunkte.

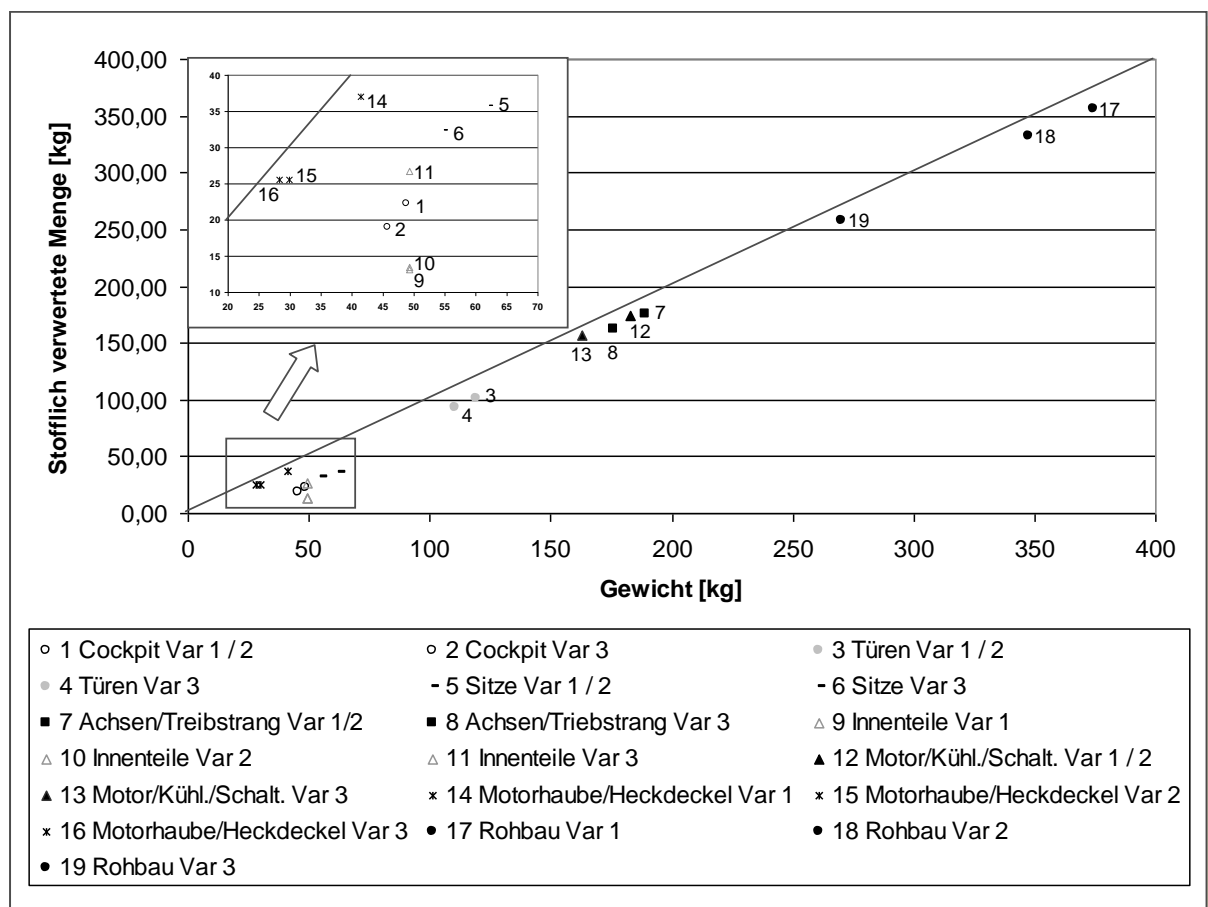


Abbildung 6.6: Vergleich ausgewählter Demontagemodule

Neben der Analyse der stofflich verwertbaren Mengenströme sind gleichzeitig die finanziellen Auswirkungen für die einzelnen Demontagemodule zu berücksichtigen. Abbildung 6.7 zeigt die Veränderungen der Demontagekosten und Recyclingerlöse für die Haupt-Änderungspunkte der drei Fahrzeugvarianten.

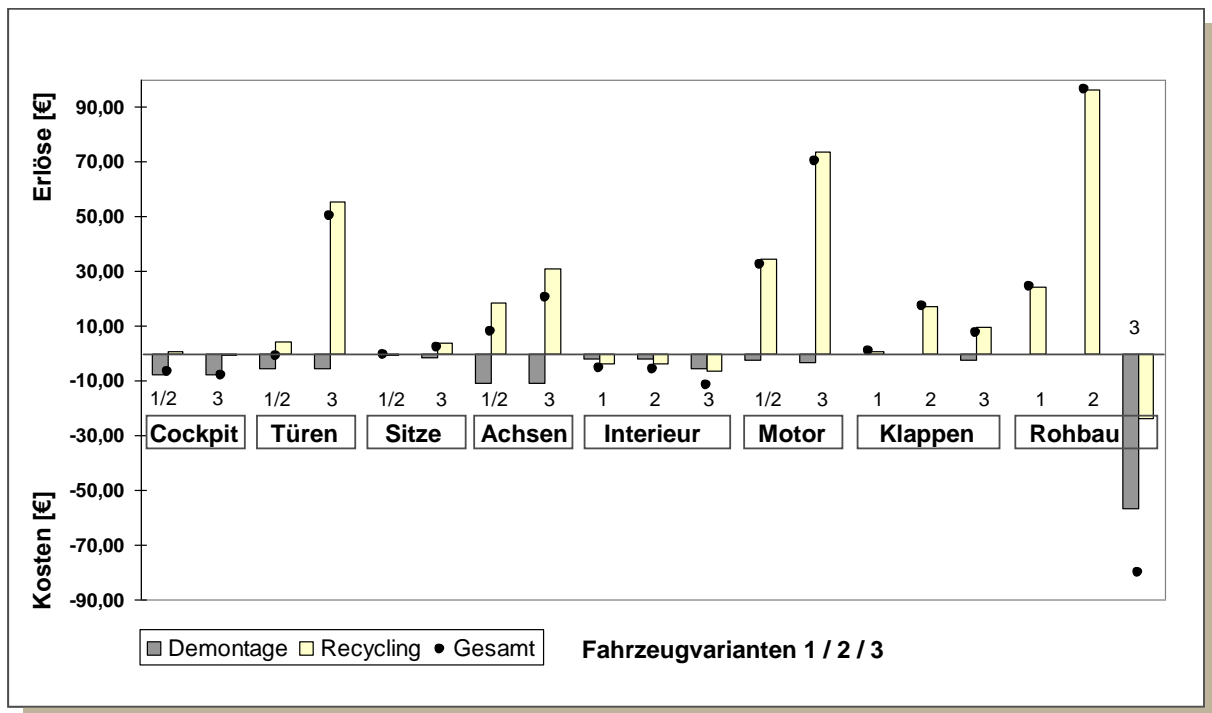


Abbildung 6.7: Kosten und Erlöse der Demontagemodule

Im Modul Cockpit sind zur Erfüllung der Gesamtfahrzeug Zielsetzungen innerhalb der drei Fahrzeugvarianten keine unterschiedlichen Demontageumfänge notwendig. Es wird trotz der Materialumstellung des Cockpitträgers innerhalb der Fahrzeugvariante 3 lediglich die Pflichtumfänge (Airbags) demontiert und verwertet. Ebenso verhält es sich bei den Türen und Achsen.

Bei dem Modul Interieur sind innerhalb der Fahrzeugvariante 1 ca. 4 kg der Kunststoff-Bauteile zu demontieren und stofflich zu verwerten. Bei der Fahrzeugvariante 2 erhöht sich der Anteil um 0,5 kg. Innerhalb der Fahrzeugvariante 3 müssen zur Erfüllung der Ziele 13,5 kg Kunststoffbauteile zusätzlich aus dem Bereich Interieur demontiert und stofflich verwertet werden. Im Bereich Sitze müssen innerhalb der Fahrzeugvariante 3 zusätzlich die Sitzkissen, im Bereich Motor/Kühlung die Abdeckung Motor sowie im Bereich Klappen/Kotflügel die Kunststoff-Heckdeckel und Kotflügel demontiert werden. Die größten Unterschiede ergeben sich im Bereich Rohbau. Während bei der Fahrzeugvariante 1 und 2 keine

Demontageumfänge zur Erfüllung der Recyclingquoten notwendig sind werden bei der Fahrzeugvariante 3 die Kunststoff-Strukturbauteile vollständig demontiert. Im Bereich Anbauteile außen werden bei allen drei Fahrzeugvarianten ca. 26 kg Kunststoff-Bauteile demontiert. Die entsprechenden Bauteile, wie beispielsweise Stossfänger, Unterbodenverkleidung Motorraum und Schwellerverkleidungen zeichnen sich insbesondere durch ihre gute Zugänglichkeit bei gleichzeitig hohem Gewicht aus. Es kann somit in kurzer Demontagezeit eine vergleichbar große Menge an stofflich zu verwertendem Material gewonnen werden.

Fazit:

Als Abschluss der Technologiephase wird das vorläufige Verwertungskonzept für das Gesamtfahrzeug festgelegt. Bei den Aufgabenschwerpunkten handelt es sich wie beschrieben um eine Grobplanung der Recyclingprozesse unter Berücksichtigung der vorläufigen Baustruktur und Werkstoffzusammensetzung des Produktes. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für die Fahrzeugvariante 1 und 2, trotz der unterschiedlichen Materialzusammensetzung, ein nahezu identischer Demontageaufwand notwendig ist, um die Zielsetzungen gemäß Altfahrzeugverordnung zu erfüllen. Fahrzeugvariante 3 hingegen erfordert eine nahezu vollständige Demontage des Rohbaus, sodass dieses Konzept insbesondere bei großen Stückzahlen wie im Bereich eines Mittelklasse Pkws aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten Nachteile aufweist. Zwar lassen sich die Recyclingziele auch erfüllen, es können jedoch die durch den Einsatz dieser Materialien entstehenden Mehrkosten bei der Fahrzeugherstellung innerhalb des Fahrzeug-Recyclings nicht zurückgewonnen werden.

Für die weiteren Untersuchungen wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels Fahrzeugvariante 1 als Referenz ausgewählt. In der nun folgenden Fahrzeugphase werden die einzelnen Konstruktionskonzepte präzisiert sowie das endgültige Recyclingkonzept des Fahrzeuges festgelegt.

6.3 Fahrzeugphase

In der Fahrzeugphase wird die endgültige Gestaltung des Produktes vorgenommen. Dazu gehört das Festlegen der Form, der Verbindungstechniken, der Oberflächenbeschaffenheiten sowie der Werkstoffe für sämtliche Einzelteile des Fahrzeuges.

Die Aufgabe aus Recyclingsicht ist es, ausgehend von dem grob festgelegten Recyclingkonzept eine Feinplanung der Demontage- und Recyclingprozesse des Fahrzeuges durchzuführen. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Optimierung der Recyclingeigenschaften auf Bauteilebene. Dabei ist die Produktgestalt optimal auf das jeweilige Recyclingverfahren abzustimmen. Neben der Korrektur von einzelnen Produktentwürfen kann auch eine Anpassung der zugeordneten Recyclingverfahren erforderlich werden.

Für das hier zu betrachtende Anwendungsbeispiel ist ausgehend von den Bewertungen innerhalb der Technologie- und Planungsphase ein Demontageumfang von ca. 30 kg Kunststoffbauteile notwendig, um die Verwertungsziele gemäß Altfahrzeuggesetz sicherzustellen. Der Vergleich auf Modulebene ergab dabei, dass hierzu ca. 26 kg aus dem Bereich Anbauteile außen und 4 kg aus dem Bereich Interieur gewonnen werden müssen. Neben den Kunststoff-Bauteilen sind insbesondere die Demontage-Pflichtumfänge zu optimieren, um somit die entstehenden Demontagekosten zu reduzieren. Anhand von ausgewählten Beispielen werden im Folgenden die einzelnen Optimierungsmaßnahmen zur Erreichung der genannten Ziele als Schwerpunkte der Fahrzeugphase vorgestellt.

Anbauteile Außen:

Das aktuelle Stossfängersystem besteht aus sieben verschiedenen Werkstoffen. Die Außenschale ist aus PC/PBT, das Innenteil ist als Stahlträger-Konstruktion ausgeführt, die Pralldämpfer sind aus PUR-Schaum. Um das Stossfängerkonzept zu recyceln, ist nach der Demontage eine weitere manuelle Zerlegung des Stossfänger-Systems erforderlich. Zur Verbesserung der Recyclingeignung wird deshalb ein neuartiges Konzept entwickelt. Die Zielsetzung ist es die Werkstoffe zu vereinheitlichen, um dadurch die zeitintensive Zerlegung zu vermeiden. Das neue Stossfänger-Konzept besteht aus einer PP/EPDM Innen- und Außenverkleidung. Der integrierte Pralldämpfer besteht aus PP-Schaum, die Anbauteile (Zierleisten, Abdeckungen) sind ebenfalls aus Polypropylen gefertigt. Lediglich die Nebelleuchten, welche konstruktiv in die Stossfänger integriert wurden, müssen demontiert werden. Mit dem neuen Polypropylen Mono-System reduziert sich der Aufwand für Zerlegen und Sortieren um bis zu 80%. Gleichzeitig können bei den nachgeschalteten Recyclingtechnologien einfachere Sortiertechnologien eingesetzt werden (siehe Abbildung 6.8).

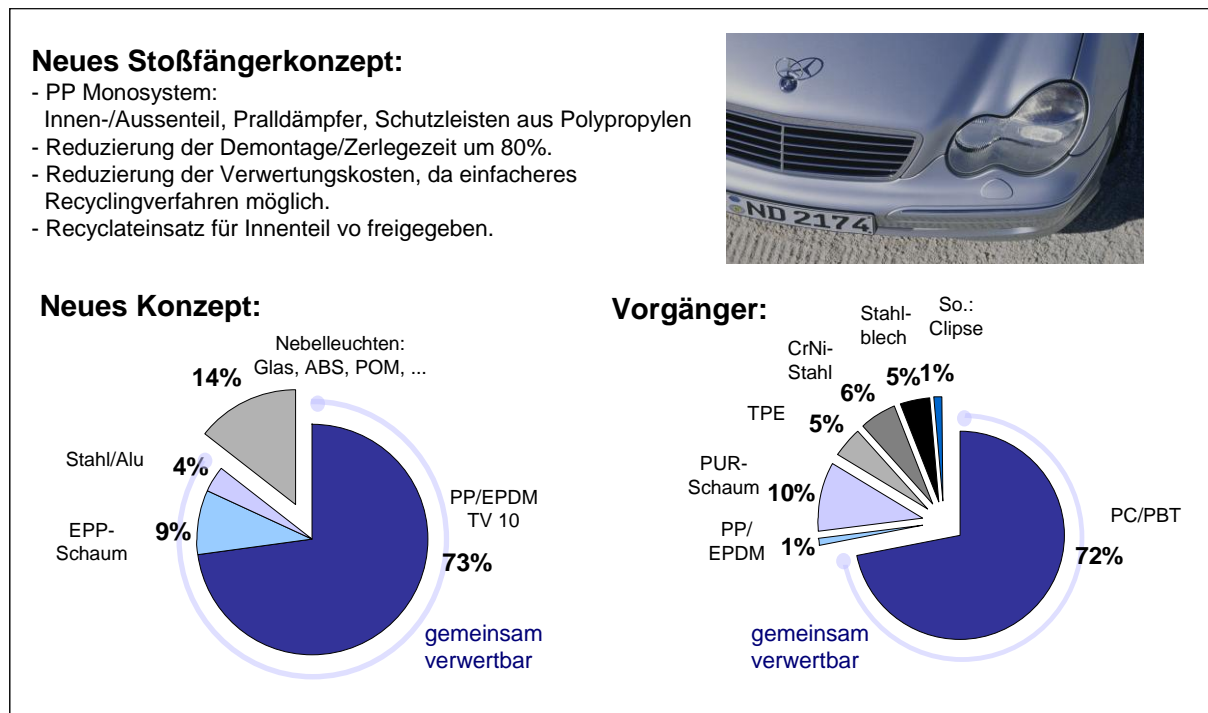


Abbildung 6.8: Recyclinggerechte Konstruktion – Beispiel Stossfänger

Neben den Stossfängern wird im Bereich Anbauteile Außen ein neuartiges Konzept für den Korrosionsschutz des Fahrzeug-Unterbodens entwickelt. Es ersetzt den bisherigen, aufgespritzten PVC-Unterbodenschutz durch Verkleidungsteile aus glasfaserverstärktem Polypropylen (PP) und erzielt damit mehrere Vorteile zugleich: Der glatte Boden des Fahrzeugs verringert die Geräuschemissionen. Die Gewichteinsparung und die bessere Aerodynamik senken den Verbrauch. Im Fall des Recyclings können die Bauteile sehr schnell demontiert, gesammelt und stofflich verwertet werden.

Einsatz von Sekundärmaterialien

Um eine flächendeckende Kreislaufwirtschaft zu realisieren ist bei der Werkstoffauswahl auch auf einen möglichst hohen Einsatz von Recyclaten zu achten. Vor allem bei Kunststoffbauteilen ist der Einsatz von Recyclaten auszubauen. Dadurch lassen sich neben der Ressourcenschonung oft auch Einsparungen der Materialkosten realisieren. Innerhalb der Fahrzeugphase wurden insgesamt 38 Bauteile mit einem Gesamtgewicht von 30 kg für den Einsatz von Sekundär-Kunststoffen untersucht und freigegeben. Dies entspricht etwa 13% der eingesetzten Kunststoffe des Gesamtfahrzeuges. Die Anwendungsfelder sind vor allem Bauteile im nicht sichtbaren Bereich, wo Oberflächenbeschaffenheiten und optische Qualität von untergeordneter Bedeutung sind. Neben den Anbauteilen außen wie Radlauf-

verkleidungen, Unterbodenverkleidung und Stossfänger-Innenteile werden Recyclate ebenso im Interieur bei Verkleidungsteilen im Kofferraum und beim Bodenteppich eingesetzt. Abbildung 6.9 zeigt die für den Recyclateinsatz freigegebenen Kunststoffbauteile der untersuchten Fahrzeugvariante.



Abbildung 6.9: Einsatz von Kunststoffrecyclaten

Demontage-Pflichtumfang:

Die vollständige Entnahme der Betriebsflüssigkeiten des Lenkungs-Systemes erfordert bei der derzeitigen Lösung einen hohen manuellen Aufwand. Nur durch Absaugen des Vorratsbehälters und Anstechen des Schlauches kann die Lenkung nicht vollständig trockengelegt werden, sodass weitere zeitintensive Demontageschritte notwendig sind. Zur Verbesserung der Entnahmemöglichkeiten sind in dem neuen System direkt an der Lenkspindel Ablassmöglichkeiten vorgesehen. Dadurch ist es möglich, die Lenkung auch im eingebauten Zustand vollständig zu entleeren.

Der Wischwasserbehälter ist, aufgrund des geringen Bauraumes im Motorbereich, zwischen Kotflügel und Rohbau angeordnet. Die entsprechende Geometrie des

Einfüllstutzens erschwert die konventionelle Entnahmemöglichkeit über Absaugung. Als Lösung wurde an die Unterseite des Wischwasserbehälters eine Ablassmöglichkeit berücksichtigt, welche im Rahmen der Trockenlegung abgeschnitten werden kann, um die Flüssigkeit vollständig abzulassen und aufzufangen

Die Demontage des Beifahrerairbags erfordert beim derzeitigen Konzept eine zeitintensive Zerlegung des Cockpits /DUR 95/. Um die Zugänglichkeiten zu verbessern, wurde das Cockpit so gestaltet, dass der Beifahrerairbag über die Öffnung des Handschuhkastens entnommen werden kann (siehe Abbildung 6.10).



Abbildung 6.10: Recyclinggerechten Konstruktion – Beispiel Vorbehandlung

Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen und Optimierungen der Recyclingeigenschaften des Produktes wird als Abschluss der Fahrzeugphase das Verwertungskonzept für das Gesamtfahrzeug festgelegt. Abbildung 6.11 zeigt für das hier betrachtete Anwendungsbeispiel die einzelnen Prozessschritte des Altfahrzeugrecyclings sowie die jeweiligen Mengenströme als Grundlage für die Erreichung der gesetzlichen Recyclingquoten.

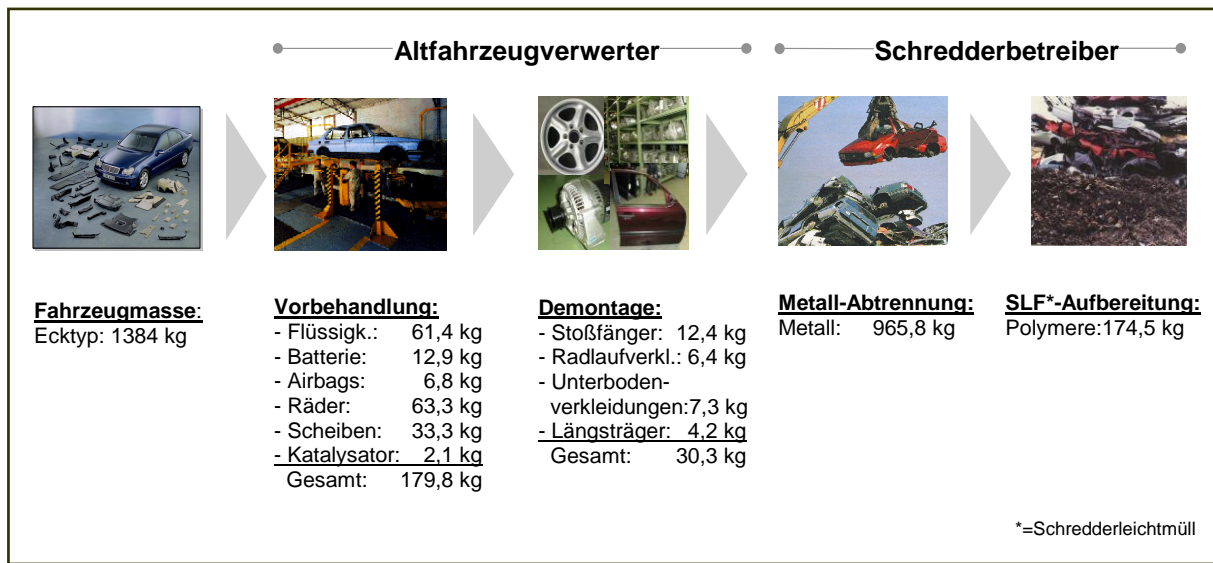


Abbildung 6.11: Recyclingkonzept neues Fahrzeugmodell

Beim Altfahrzeugverwerter werden zunächst im Rahmen der Vorbehandlung 180 kg demontiert. Dies beinhaltet die Betriebsflüssigkeiten sowie die gesetzlichen Pflichtdemontageumfänge. Danach müssen zur Erreichung der vorgeschriebenen Recyclingquoten von 95% (85% stofflich, 10% energetisch) 30 kg Kunststoffbauteile demontiert werden. Es handelt sich dabei ausschließlich um Bauteile, für die es bereits heute etablierte Verwertungswege gibt. Die Gesamtdemontagezeit beim Altfahrzeugverwerter beträgt in Summe ca. 100 Minuten. Beim Schredderprozess werden zunächst die Metalle abgetrennt (966 kg). Die organischen Rückstände (175 kg) werden energetisch verwertet. Insgesamt kann eine stoffliche Recyclingquote von 85% und eine Gesamtrecyclingquote von 95% erreicht werden. Die dabei entstehenden Verwertungserlöse betragen in Summe ca. 54 €. Die erzielbaren Materialerlöse (Stahl, Aluminium, Kunststoffe, etc.) abzüglich den Verfahrenskosten (Prozesskosten Schredder, Recyclingverfahren und energetische Verwertung SLF) belaufen sich auf 104 €. Die Demontageskosten betragen 50 €. Nicht berücksichtigt sind die Transportkosten der einzelnen Fraktionen und der Karosserie.

Als Abschluss der Fahrzeugphase ist das Verwertungskonzept in entsprechender Form zu dokumentieren. Hierzu werden alle Maßnahmen, die zur Erreichung der jeweiligen Recyclingziele erforderlich sind, beschrieben. Sie stellen die Basis für die

Optimierung der umweltverträglichen Behandlung von Altfahrzeugen dar und sind somit ein elementarer Baustein zum Aufbau und zur Optimierung von Stoffkreisläufen.

In der Dokumentation werden die Gewichts- und Werkstoffzusammensetzungen derjenigen Bauteile beschrieben, die für eine stoffliche Verwertung und Schadstoffentfrachtung aus dem Fahrzeug demontiert werden müssen. Zusätzlich werden weitere Informationen über den Demontageablauf und die notwendigen Demontagewerkzeuge bereitgestellt. Damit der Altfahrzeugverwerter auf zukünftige Marktentwicklungen flexibel reagieren kann, werden für alle recyclinggeeigneten Bauteile die Materialzusammensetzungen und die Einbauorte dokumentiert. In Kooperation von europäischen Automobilherstellern wurde hierzu ein gemeinsames Informationssystem aufgebaut, in dem all diese Daten einheitlich gespeichert werden können (siehe Abbildung 6.12).

The screenshot shows the IDIS Plant software interface. The title bar reads "IDIS Plant - [Abbildung]". The menu bar includes "Datei", "Daten", and "Ansicht ?". The toolbar contains icons for file operations, search, and vehicle-related functions. The main window displays a 3D exploded view of a Mercedes-Benz C-Class W 203 2001- car, with various components labeled with numbers (2.1 to 2.10). A legend on the left identifies materials: ABS (orange), PA (grey), PE (green), PMMA (yellow), PP (red), PVC (blue), PUR (cyan), and ANDERE (dark blue). On the right, a table lists the components:

I	Sno	Teil
	2.1	Stoßfängerabdeck
	2.2	Stoßfängerabdeck
	2.3	Unterbodenverkle
	2.4	Unterbodenverkle
	2.5	Unterbodenverkle
	2.6	Stoßfänger
	2.7	Radhausschale
	2.8	Schwellerabdecku
	2.9	Unterbodenverkle

Below the table, the selected component "2.1 Stoßfängerabdeckung" is detailed. The tabs "Allgemeines", "Befestigungen", "Werkzeuge", "Methode", "Kommentar", and "Parameter" are visible. The "Allgemeines" tab shows the following data:

Ausführungsvariante	Alle	Stückzahl	1
Familie	PP	Gewichtsmerkmal	7620 g
Werkstoffe	PP+EPDM-TD30	Geschätzte Dauer	0
Leistung		Kennzeichnung	marked

Abbildung 6.12: Dokumentation Recyclingkonzept - IDIS

Die Bündelung aller relevanter Material- und Demontageinformationen stellt einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Effizienz von Demontagevorgängen dar und schafft dadurch die Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling.

7 Fazit und Ausblick

Um die Zielsetzungen aus der europäischen Altfahrzeugrichtlinie sicherzustellen ist die möglichst frühzeitige Berücksichtigung der Recyclinganforderungen im Rahmen der PKW-Entwicklung unabdingbar. Wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung ist dabei das optimale Zusammenspiel der Faktoren Ablauf-, Aufbauorganisation und Rechnerhilfsmittel.

Die durchgeführte Analyse des aktuellen Standes zur recyclingorientierten Produktentwicklung hat gezeigt, dass innerhalb der einzelnen Bausteine noch Defizite festzustellen sind, insbesondere aber das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten bislang nicht durchgängig umgesetzt ist. Im Rahmen der Ablauforganisation wurde die Ableitung von Recyclingzielen in der frühen Phase der Produktentwicklung bisher nicht ausreichend berücksichtigt. Dabei ist die Analyse von zukünftigen Einflussfaktoren wie neue Recyclingtechnologien oder Änderungen in der Gesetzgebung ein wesentlicher Gesichtspunkt. Bei der organisatorischen Einbindung des Recyclings wurde in den vorhandenen Ansätzen der Konstrukteur als zentraler Verantwortlicher für die Gestaltung des Produktes und dessen Recyclingkonzept festgelegt. Dieser Ansatz ist jedoch im Zuge zunehmender Anforderungen an die Konstruktionsabteilungen innerhalb komplexer Entwicklungsprojekte nur schwer umsetzbar, da es ein hohes Maß an dezentralem Expertenwissen voraussetzt. Gemeinsames Merkmal der bestehenden Rechnerhilfsmittel ist die unzureichende Ankopplung der Systeme sowohl an die Ablauforganisation der Entwicklung als auch an die bestehenden Produktdatenmodelle.

Als Lösungsansatz wurde innerhalb dieser Arbeit eine Methodik erarbeitet, welche die Recyclinganforderungen systematisch in die Fahrzeugentwicklung integriert. Das erarbeitete Gesamtkonzept wurde in vier Bausteine gegliedert, welche als kombiniert zu verwendende Komponenten betrachtet werden sollen.

Die Grundlage bildet ein Vorgehensmodell, welches die Einbindung der Recyclinganforderungen am besten Fahrzeugentwicklungsprozess ausrichtet und in Phasen zunehmender Konkretisierung unterteilt. Dabei wurde ein Konzept erarbeitet, welches die Ableitung von Recyclingzielen in der frühen Phase der Entwicklung durch Bildung von Recyclingszenarien ermöglicht und in den nachfolgenden Phasen der Entwicklung konsequent verfolgt. Als zentrales Element innerhalb der einzelnen

Phasen wurde ein recyclingorientierter Problemlösezyklus definiert, der durch iteratives Vorgehen geprägt zum optimalen Ergebnis führt. Er wird durch ein Planungsinstrument unterstützt, welches gekoppelt an bestehende Produktdokumentations Systeme mögliche Demontage- und Recyclingprozesse eines Fahrzeuges simuliert und bewertet. Die organisatorische Umsetzung innerhalb des Entwicklungsprojektes erfolgt durch ein Recyclingteam, welches es ermöglicht das Recyclingwissen in die komplexen Entwicklungsabläufe zu integrieren und mit allen Prozessbeteiligten zeitlich und inhaltlich abzustimmen.

Die Auswertung verschiedener Recyclingszenarien am Beispiel eines Mittelklasse-PKW hat gezeigt, dass mit der heutigen Prozesskette der Altfahrzeugverwertung die Zielsetzungen der europäischen Altfahrzeugrichtlinie nicht kostendeckend erreichbar sind. Erst unter Berücksichtigung neuer Verwertungstechnologien kann die wirtschaftliche Situation verbessert werden. Mit dem erarbeiteten Recyclingkonzept und den am Fahrzeug umgesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Recyclingeigenschaften wurde die Anwendbarkeit der Methodik und die Funktionalität des Planungsinstrumentes nachgewiesen und somit die Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling des Fahrzeuges an seinem Produktlebensende geschaffen.

Zukünftige Arbeiten auf dem Forschungsgebiet müssen sich sowohl auf die weitere Optimierung der Planungsmethoden und Hilfsmittel zur recyclingorientierten Produktentwicklung als auch auf die Weiterentwicklung von Recyclingverfahren richten.

Bei der Weiterentwicklung des Planungsinstrumentes gilt es zukünftig den Bewertungsraum um umweltliche Kenngrößen zu erweitern, um dadurch die Balance zwischen ökonomischen Zwängen, gesetzlichen Vorschriften und ökologischen Forderungen bei der Auswahl der geeigneten Verwertungsstrategie für PKW zu finden. Die bestehenden Ansätze und Tools zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Produkten können dabei in das vorhandene Datenmodell integriert werden.

Der Schwerpunkt weiterführender Arbeiten auf dem Gebiet des Altfahrzeugrecyclings muss auf der Entwicklung und Nutzung großtechnischer Verfahren zur Aufbereitung der Shredderleichtfraktion liegen, um dadurch eine kostenintensive Demontage von Bauteilen zu vermeiden. Hier gilt es insbesondere die vorhandene Infrastruktur mit entsprechenden Aufnahmekapazitäten für Sekundärrohstoffe intelligent miteinander zu verknüpfen.

Literaturverzeichnis

- /ARG 00/ Arbeitsgemeinschaft (ARGE) Altauto. Erster Monitoringbericht der ARGE Altauto. Frankfurt, 2000. Internet: <http://www.arge-altauto.de>.
- /AMB 97/ Ambrosy, S.: Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung. Dissertation TU München. Konstruktionstechnik München, Band 26. Aachen: Shaker Verlag, 1997
- /BAA 04/ Baake, R.: Zeit für Mülldeponien läuft ab. Pressemitteilung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Nr. 156/04. Berlin, 01.06.04. Internet: <http://www.bmu.de>.
- /BAL 01/ Balasubramanian, B.: Digitale Fahrzeugentwicklung bei Mercedes-Benz. In: Tagungsband Automobiltechnische Konferenz – Virtuelle Produktentstehung im Automobil- und Motorenbau. Wiesbaden, 2001.
- /BDS 84/ BDS-Bundesverband der Deutschen Schrottwirtschaft eV: Vom Schrott zum Stahl. Düsseldorf: Verlag Handelsblatt GmbH, 1984.
- /BEH 96/ Behrendt, S.; Köplin, D.; Kreiblich, R.; Rogall, H.; Seidemann, T.: Umweltgerechte Produktgestaltung; ECO-Design in der elektronischen Industrie. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- /BMU 97/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung über die Überlassung und umweltgerechte Entsorgung von Altautos – Altauto-Verordnung (AltautoV). Bonn, 04.07.1997
- /BMU 97-1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Freiwillige Selbstverpflichtung der Wirtschaft und Altautoverordnung – eine Information des Bundesumweltministerium. Referat WA II(30114-6/0). Bonn, 1997
- /BMU 86/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz-AbfG). Bonn, 27.12.1986.
- /BMU 94/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG). Bonn, 06.10.1994.
- /BMU 01/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen – Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV). Berlin, 2001.
- /BMU 02/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Gesetz über die Entsorgung von Altfahrzeugen – Altfahrzeug-Gesetz (AltfahrzeugG). Berlin, 21.06.2002.

- /BMU 02-1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung über die Überlassung und umweltgerechte Entsorgung von Altfahrzeugen: Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV). Berlin, 2002.
- /BRE 92/ Breuer, H.; Dolfen, E.: Kunststoff-Recycling - Handbuch 1992. Eine Dokumentation des Forschungsinstituts Kunststoff-Recycling Krefeld und Willich. Heidelberg: Hüthig Verlag, 1992.
- /BRI 94/ Brinkmann, T.; Ehrenstein, G.W.; Steinhilper, R.: Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung: Anforderungen, Werkstoffwahl, Gestaltung, Praxisbeispiele. Augsburg: WEKA Verlag GmbH, 1994.
- /BOE 00/ Boes, J.: Analyse und Bewertung komplexer Industrieprodukte hinsichtlich der Anforderungen der recyclinggerechten Konstruktion am Beispiel Automobil. VDI Berichte 1570. Fellbach, 2000.
- /BOP 94/ Bopp, R.; Bullinger, H.-J.: Methoden und Hilfsmittel zur recyclinggerechten Produktentwicklung. VDI-Berichte 1171, Seite 145-185. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- /DAE 94/ Daenzer, W.; Huber, F.: System Engineering, 8.Auflage. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1994.
- /DC 03/ DaimlerChrysler AG: Der Mercedes-Benz SLR McLaren. Modelle und technische Daten. Internet: <http://www.mercedes-benz.de> (2003)
- /DIE 95/ Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung. Dissertation TU München. Berlin: Springer Verlag, 1995.
- /DIN 8580/ DIN 8580: Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- /DIN 8591/ DIN 8591: Fertigungsverfahren Zerlegen. Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- /DRE 98/ Dresch, H.: Energetische Verwertung von Kunststoffen – Verwertung von Shredderleichtfraktion in der MVA Würzburg. Beitrag zum Experten-Workshop am 3. Juni 1998 im Technologiezentrum Oberhausen
- /DUR 95/ Durante, R.: Technisch-wirtschaftliche Analyse des Recyclings von ausgewählten Bauteilen aus der Automobilindustrie. Diplomarbeit Universität Karlsruhe, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik. Karlsruhe, 1995.
- /EG 93/ Entscheidung (94/3/EG) der Europäischen Kommission zum European Waste Catalogue (EWC). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, Abl. L 78/32, 20.12.1993.

- /EG 00/ Richtlinie des Rates der Europäischen Union: 2000/53/EG vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge. Erschienen in: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. Amtsblatt Nr. L 269 Seite 34 bis 43, 21.10.2000.
- /EG 05/ Entscheidung der Kommission zur Festlegung der Einzelheiten für die Kontrolle und Einhaltung der Zielvorgaben für die Wiederverwendung/ Verwertung und Wiederverwendung/Recycling: 2005/293/EG. Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2004) 2894, 13.4.2005.
- /EHR 03/ Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Aktualisierte und überarbeitete Auflage. München: Hanser Verlag, 2003.
- /EVE 05/ Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- /EWG 91/ Richtlinie des Rates 91/156/EWG zur Änderung der Richtlinie 75/442/EWG über Abfälle. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft; Abl. Nr. L 78 S.32, 18.03.1991.
- /FAT 82/ FAT-Forschungsvereinigung Automobiltechnik: Aluminiumverwendung im Automobilbau und Recycling – eine Studie. Frankfurt: Schriftenreihe der FAT Nr. 20, 1982.
- /FRA 01/ François, O.; de Féraudy, H.: Industrial recycling of plastics from automotive shredder residues. Beitrag zum International Automobile Recycling Congress: Genf, 2001.
- /FRE 00/ Freitag, M.: Entwicklung eines Instrumentariums zur Integration recyclingorientierter Qualitätsplanung in die Produktentwicklung. Dissertation Technische Universität Dortmund. Aachen: Shaker-Verlag, 2000
- /GAU 96/ Gausemeier, J.; Fink, A.; Schalke, O.: Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien. München: Hanser-Verlag, 1996
- /GOR 02/ Goroncy, J.: Transparent und effizient. Mercedes-Development-System (MDS). Zeitschriftenaufsatz: Automobil-Industrie, Band 47 (2002). Heft 11, Seite 38-40. Verlag: Moderne Industrie, 2002.
- /HAB 94/ Habermann, R.; Letmathe, B.R.: Recycling von Kupfer. TU Clausthal Archiv Band 2. Heere: Wanderer Verlag, 1994.
- /HAE 94/ Härdtle, G.: Altautoverwertung. Reihe Beihefte zu Müll und Abfall, Nr. 32. Berlin, 1994.
- /HAH 98/ Hahn, A.; Endstation. Wie funktioniert die umweltgerechte Entsorgung eines Altautos? Der ADAC hat nachgefragt. In: ADAC Motorwelt, Nr. 11 Seite 58-60, 1998.

- /HAR 94/ Hartel, M.; Spath, D.: Öko-Portfolio: Methode zur Beurteilung der Recyclingeignung technischer Serienprodukte. VDI-Berichte 1171. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- /HAR 02/ Harloff, B.; Frosch, O.; Rindfleisch, O.: Von der Wertewelt zum innovativen Produkt. Zeitschriftenaufsatz Motortechnische Zeitschrift. Sonderausgabe: die neuen Mercedes-Benz E-Klasse. Band 63, 2002.
- /HIL 91/ Hildebrandt, K.: Produktrecycling von Kopiergeräten. In: VDI Bericht Nr. 906 – Recycling eine Herausforderungen für den Konstrukteur. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- /IBU 05/ Informationszentrum für betrieblichen Umweltschutz des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg. Struktur des Umweltrechts. Internet: <http://www.umweltschutz-bw.de> (03/2005).
- /JAM 04/ Japan Automobile Manufacturers Associations (JAMA). Principles of the automobile recycling law. In: The motor industry of Japan – annual report 2004. Internet: <http://www.jama-english.jp> (03/2005).
- /JUN 94/ Jungbauer, A.: Recycling von Kunststoffen. Würzburg: Vogel Verlag, 1994.
- /KAH 96/ Kahmeyer, M.; Rupprecht, R.: Recyclinggerechte Produktgestaltung. Vogel Verlag. Würzburg, 1996.
- /KBA 02/ Kraftfahrt-Bundesamt: Statistiken Kraftfahrzeuge. Flensburg, 2002. Internet: <http://www.kba.de> (20.09.2002).
- /KOE 96/ Koellner, W; Fichtler, W: Recycling von Elektro- und Elektronikschrott - Einführung in die Wiederverwertung für Industrie, Handel und Gebietskörperschaften. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- /KOE 96-1/ von Koeller, H.: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. Textausgabe mit Erläuterungen. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1996.
- /KOE 97/ von Koeller, H.: Einführung in die grundsätzlichen Veränderungen durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. In: Sichimmelpfeng, L.; Gessenich S. (Hrsg.): Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. Neue Regelungen und Anforderungen. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- /KRI 94/ Kriwet, A.: Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung. Dissertation Technische Universität Berlin. München: Hanser-Verlag, 1994.

- /KUR 94/ Kurth, H.W.: Integriertes Konzept zur wirtschaftlichen Demontage und Verwertung von Altfahrzeugen – Teil1: PKW-Demontageanlagen. Institut für Entwicklungsmethodik und Fertigungstechnologien umweltgerechter Produkte (IUP): Herborn-Seelbach, 1994.
- /KUR 95/ Kurth, H.W.: Integriertes Konzept zur wirtschaftlichen Demontage und Verwertung von Altfahrzeugen – Teil2: Stoff- und Teilkreisläufe. Institut für Entwicklungsmethodik und Fertigungstechnologien umweltgerechter Produkte (IUP): Herborn-Seelbach, 1995.
- /LÖH 95/ Löhr, K.; Melchiorre, M.; Kettemann, B.-U.: Aufbereitungstechnik: Recycling von Produktionsabfällen und Altprodukten. München: Hanser Verlag, 1995.
- /MEE 95/ Meedt, O.; Feldmann, K.: Entwicklung einer CAD-CADis Verfahrenskette auf Basis recyclingrelevanter Produktkennzeichnung. In: Umweltinformationssysteme in der Produktion. Berlin: Metropolis-Verlag, 1996.
- /MEN92/ Menges, G.; Michaeli, W.; Bittner, M.: Recycling von Kunststoffen. München: Hanser Verlag, 1992.
- /MEY 83/ Meyer, H.: Recyclinggerechte Produktgestaltung. Dissertation Technische Universität Berlin. VDI-Fortschrittsberichte Band 98. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983.
- /MIC 93/ Michaeli, W.; Bittner, M.; Wolters, L.: Stoffliches Kunststoffrecycling – Anlagen, Komponenten, Hersteller. München: Hanser Verlag, 1993.
- /NAT 98/ Nathani, C.;Arnsberg, W.: Materialfluss spezifischer Abfallarten und Abfallkennziffern bedeutender Bereiche. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe, 1998.
- /NEU 96/ Neumann, U.: Methodik zur Entwicklung umweltverträglicher und recyclingoptimierter Fahrzeugbauteile. Dissertation Universität Paderborn, 1996.
- /NIC 96/ Nickle, W.: Recycling Handbuch: Strategien-Technologien-Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- /OBE 02/ Obermeier; Markowski: Gasification of shredder residue at SVZ Schwarze Pumpe. Beitrag zum „International Automobile Recycling Congress“. Genf, 2002
- /OSS 00/ Osseforth, A.: Leitfaden zur Durchführung von Qualitygates im Entwicklungsprozess. DaimlerChrysler, 2000.

- /PAH 05/ Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung. Sechste Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- /PAS 00/ Paßvoß, T.: Untersuchungen zur Aufbereitung und Verwertung von Shredderleichtfraktion aus der Behandlung von Altkarosserien in Shredderanlagen. Dissertation an der Universität Witten/Herdecke. Schriftenreihe Umwelttechnik und Umweltmanagement, Band 25, 2000.
- /REN 96/ Renken, M.: Nutzung recyclingorientierten Bewertungskriterien während des Konstruierens. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Göttingen, Cuvillier Verlag, 1996.
- /RIE 03/ Riepe, B.: Integrierte Produktstrukturmodellierung in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Nordersted: BoD GmbH, 2003
- /RUH 00/ Ruhland, K.; Finkbeiner, M.; Stark, B.: Umwelt- und recyclingintegrierte Produktentwicklung im Automobilbau. In: VDI-Tagungsband 1570, Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte. Fellbach, 2000.
- /RUP 04/ Ruppel, R.; Bäuml, A.; Haab, J.: Projektmanagement im Produktentstehungsprozess des neuen CLS. Zeitschriftenaufsatz: Automobiltechnische Zeitung ATZ, Band 106 (2004). Sonderheft: Die neue Mercedes-Benz CLS-Klasse. Verlag: Moderne Industrie, 2004.
- /SCH 95/ Schlögl, M.: Recycling von Elektro- und Elektronikschrott. Würzburg: Vogel-Verlag, 1995.
- /SCH 95-1/ Schmidt, J.; Leithner, R.: Automobil-Recycling – stoffliche, rohstoffliche und thermische Verwertung bei Automobilproduktion und Autautorecycling. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- /SCH 95-2/ Schimmelpfeng, L.; Zubiller, C.-O.; Engler, M.: Der europäische Abfallkatalog. Berlin: Springer Verlag, 1995.
- /SCH 00/ Schöpf, H.-J.: Mercedes-Benz Entwicklung im Verbund der Daimler-Chrysler Marken. In: VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2000
- /SHE 02/ Shell: Pkw-Szenarien; Mehr Autos - weniger Verkehr? Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020. Internet: <http://www.shell.com> (20.09.2002)
- /SIM 93/ Simon, M.: Objective Assessment of Design for Recycling. In: Proceedings of the international conference on engineering design ICED 1993. Zürich: Heurista Verlag, 1993.

- /SOE 03/ Soler Schreiber, T.: Bewertung von Recyclingtechnologien für die Shredderleichtfraktion. Diplomarbeit an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Lehrstuhl für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik. Cottbus, 2003.
- /SUH 96/ Suhr, M.: Wissensbasierte Unterstützung recyclingorientierter Produktgestaltung. Schriftenreihe Konstruktionstechnik Band 33. Hrsg. W. Beitz, 1996.
- /TAS 93/ TA Siedlungsabfall. Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. 14. Mai, 1993.
- /THE 02/ Thermoselect: Das Hochtemperatur-Recycling Verfahren. Unterlagen zum Betriebsversuch mit Shredderleichtfraktion in der Thermoselect-Anlage in Karlsruhe vom 27. Bis 29. November 2002. Karlsruhe, 2002.
- /TOB 93/ Tober, H.: Recyclinggerechtheit von „Weißer Ware“. VDI Berichte, 1089, Seite 141-156, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- /TRI 97/ Tritsch, C.: Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter. Dissertation Universität Karlsruhe. Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Band 66, 1997.
- /ULR 91/ Ulrich, R.: Erkenntnisse aus der Fertigung für die Entwicklung und Konstruktion für Recycling-Motoren. In: VDI Bericht Nr. 906 – Recycling eine Herausforderungen für den Konstrukteur. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- /VDA 97/ VDA Richtlinie 231-106. Werkstoff Klassifizierung im Kraftfahrzeug (1997). Internet: <http://www.dkf-ev.de>
- /VDI 93/ VDI-Richtlinie 2243, Blatt 1: Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte; Grundlagen und Gestaltungsregeln. Berlin: Beuth Verlag, 1993.
- /VDI 93-1/ VDI-Richtlinie 2221. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag, 1993.
- /VDI 02/ VDI-Richtlinie 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Neue, überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth Verlag, 2002.
- /VW 02/ Volkswagen AG: Anlage und Verfahren zur Aufbereitung von Shredder-Rückständen. Internationale Patentschrift WO 02/34401 A1 vom 02.05.2002
- /WAG 95/ Wagner, K.: Abfall- und Kreislaufwirtschaft. Erläuterungen zu deutschen und europäischen Regelwerken. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.

- /WEN 91/ Wende, A.: Konzept für ein recyclingorientiertes Produktmodell. In: Recycling – eine Herausforderung für den Konstrukteur, Tagung Bad Soden 1991. VDI-Verlag, VDI-Berichte 906, 1991.
- /WIT 92/ Witte, K.H.; Stolze, S.: neue Organisationsformen für die montage- und recyclinggerechte Konstruktion. In: VDI-Berichte, Montage und Demontage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- /WOL 97/ Wolters, L.; Marwick, J.v.; Regel, K.; Lackner, V.; Schäfer, B.: Kunststoffrecycling: Grundlagen-Verfahren-Praxisbeispiele. München: Hanser Verlag, 1997.

Lebenslauf

Name: Klaus Ruhland

Adresse: Alte Holzhäuser Strasse 6
73066 UHINGEN

Geburtsdatum, -ort: 06.05.1969 in Geislingen an der Steige

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulausbildung: September 1976 - Mai 1989
Grundschule Geislingen
Helfensteingymnasium Geislingen
Wirtschaftsgymnasium Geislingen
Abschluss: mathem.-naturwiss. Abitur

Wehrdienst: Juni 1989 - September 1990
Flugkörpergeschwader 1, Landsberg/Lech

Studium: Oktober 1990 - Februar 1996
Maschinenwesen an der
Technischen Universität München
Fachrichtung: Produktionstechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur (TU)

Beruf: März 1996 – April 1999
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
PKW Vorentwicklung der Daimler-Benz AG, Stuttgart.

April 1999 – Januar 2002
Projektingenieur,
Abteilung Umweltgerechte Produktentwicklung
DaimlerChrysler AG, Stuttgart.

seit Januar 2002
Teamleiter Recyclinggerechte Produktentwicklung
Abteilung Umweltgerechte Produktentwicklung
DaimlerChrysler AG, Stuttgart